

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

**CARACTERIZAÇÃO E ZONAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR DE
CIRCUITOS HIDRÁULICOS – APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DE
PADROSELOS**

Susana Isabel Namorado Nunes
(Licenciada em Engenharia Geológica)

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Prof^a. Doutora Ana Paula Silva
Co-orientador: Dr. Sérgio Parada Rosa

Lisboa
2010

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o culminar de um percurso académico exigente, nem sempre fácil, mas que a autora conseguiu completar pela sua determinação e incentivo dos que a rodearam. Assim sendo, gostaria de agradecer a um grupo de pessoas, sem as quais não teria sido possível a concretização desse objectivo:

- ❖ À Doutora Ana Paula Silva, Prof^a. auxiliar do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, pela amizade, coordenação e revisão crítica deste trabalho;
- ❖ Ao Dr. Sérgio Parada Rosa, pela coordenação do estágio realizado na empresa CENORGEO e pela total disponibilidade para qualquer esclarecimento;
- ❖ À gerência da empresa CENORGEO, pela possibilidade de realização deste estágio;
- ❖ À empresa CENORGEO, pela autorização concedida para a utilização de dados do anteprojecto detalhado, que se acompanhou;
- ❖ Ao Eng.º Manuel Romeiro, pelo auxílio, disponibilidade, simpatia e colaboração;
- ❖ Ao Eng.º Nelson Rodrigues, pelos esclarecimentos, colaboração e disponibilidade concedidos;
- ❖ Ao Eng.º Alfredo Nunes e Eng.^a Vitória Rodrigues, pela simpatia, atenção e disponibilidade;
- ❖ Ao Luís Ferreira, pela colaboração, apoio e disponibilidade mostradas;
- ❖ Aos restantes colegas da CENORGEO com quem a autora teve o prazer de contactar, pela simpatia;
- ❖ Aos pais, pelo apoio e oportunidade de um futuro melhor;
- ❖ Ao namorado, pelo apoio, incentivo e compreensão durante todo o percurso;

- ❖ À restante família, pelo apoio e incentivo;
- ❖ À colega e amiga Maria Luísa Bragança, pelo incentivo e partilha de longas horas de estudo ao longo de todo o percurso académico;

A todos, o mais profundo obrigado.

RESUMO

Os empreendimentos hidroeléctricos constituem um dos principais sistemas de produção de energias renováveis em Portugal e encontram-se geralmente implantados em maciços rochosos, recorrendo frequentemente ao espaço subterrâneo.

Um aproveitamento hidroeléctrico, para além da barragem que garante o armazenamento de água, inclui em regra uma tomada de água e, em seguida, um túnel de acesso/conduto forçada, se a energia potencial da água na albufeira for muito significativa, uma central hidroeléctrica, à superfície ou subterrânea; quando subterrânea inclui ainda uma chaminé de equilíbrio, e uma restituição, que pode envolver um túnel/galeria.

A presente dissertação tem como objectivo rever, numa primeira parte, a metodologia dos estudos geotécnicos preliminares de circuitos hidráulicos subterrâneos, desde o reconhecimento de superfície, passando pelos métodos de prospecção e ensaio, até ao zonamento geotécnico preliminar do maciço. O trabalho prossegue com a descrição dos estudos geotécnicos desenvolvidos no âmbito das fases de estudo prévio e de anteprojecto do Aproveitamento Hidroeléctrico de Padroselos, no Alto Tâmega. Apresentam-se o enquadramento geológico e geomorfológico geral para o local desta obra, hidrogeologia, tectónica, neotectónica e sismicidade, bem como os trabalhos de prospecção realizados para o circuito hidráulico. Por fim, contempla uma breve análise dos resultados obtidos neste programa, o zonamento geotécnico preliminar derivado e os trabalhos de prospecção geotécnica complementares recomendados para a fase de estudos de anteprojecto detalhado.

Palavras-chave: estudos geotécnicos, circuitos hidráulicos, prospecção geotécnica preliminar, zonamento geotécnico preliminar.

ABSTRACT

Hydropower is the most important and widely renewable source of energy, namely in Portugal, where it encompasses usually underground structures located in rock masses.

Besides a dam for water storage, the hydroelectric development includes a water intake followed by an access tunnel/penstock (in cases where the potential energy of water is very significant), and a hydropower house; whenever this is an underground cavern, it includes also a surge shaft and a tailrace, usually contemplating a tunnel/adit.

This thesis reviews, briefly, the methodology adopted for the preliminary design of underground hydraulic circuits geotechnical investigations, namely geological and geotechnical field works, in-situ and laboratory tests, and the preliminary geotechnical zoning of the rock mass. Next, the geotechnical studies developed for the Padroselos Hydro Power Plant, in Alto Tâmega, are also described. The geomorphological and geological frameworks, hydrogeology, tectonics, neotectonics and seismicity features of the site are presented, as well as the site investigation plan undertaken for the underground hydraulic circuits. Finally, a brief analysis of the main results achieved, the preliminary geotechnical zoning assessed and some recommendation for additional site investigations for the final design studies are offered.

Key words: Geotechnical studies, hydraulic circuits, preliminary ground investigation, preliminary geotechnical zoning.

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

A	Regime anormal (percolação)
c	Coesão
c_u	Resistência ao corte em condições não drenadas
D	Diâmetro
d_{50}	Diâmetro médio do quartzo
De	Desobstrução das fracturas (regime anormal)
Di	Dilatação das fracturas (regime anormal)
E	Módulo de deformabilidade
F	Grau de fracturação do maciço
Fr	Fracturação hidráulica (percolação)
F_{Schim}	Índice Schimazek ou coeficiente de abrasividade
$I_a(50)$	Índice de anisotropia à compressão pontual
$I_s(50)$	Índice de resistência à compressão pontual
J_a	<i>Joint Alteration Number</i> – alteração das paredes das diaclases (sistema Q)
J_n	<i>Joint Set Number</i> – número de famílias de diaclases (sistema Q)
J_r	<i>Joint Roughness Number</i> – rugosidade das diaclases (sistema Q)
J_w	<i>Joint Water Reduction Factor</i> – condições hidráulicas do maciço (sistema Q)
k	Coeficiente de permeabilidade equivalente do maciço
l	Comprimento
L	Regime laminar (percolação)
Lu	Unidade Lugeon
MW	Mega Watt
O	Obstrução das fracturas (regime anormal)
P	Pressão
P_{aj}	Ajustamento da orientação das fracturas (RMR)
P_{or}	Orientação da compartimentação em relação ao eixo principal da estrutura subterrânea (RMR)
P_w	Condições hidrogeológicas do maciço (RMR)
PT	Perda total (percolação)
Q	Conteúdo em quartzo equivalente em minerais abrasivos / índice de qualidade do maciço do Sistema Q (Barton)

Q-P	Caudal <i>versus</i> pressão
T	Regime turbulento (percolação)
V	Velocidade de propagação / Volume
V _p	Velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais
V _s	Velocidade de propagação das ondas sísmicas transversais
W	Estado de meteorização do maciço

Alfabeto Grego:

α	Coeficiente de sismicidade
ϕ	Ângulo de atrito
ν	Coeficiente de Poisson
Ω	Ohm
σ_c	Resistência à rotura em compressão
σ_{ci}	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
σ_t	Resistência à rotura em tracção

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ACE	Agrupamento Complementar de Empresas
CAI	<i>Cerchar Abrasivity Index</i> - Índice de abrasividade Cerchar
DGGM	Direcção Geral de Geologia e Minas
DRI	Índice de dureza
DU	Classe de dureza
EC8	Eurocódigo 8
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GSI	<i>Geological Strength Index</i> (Hoek)
IGE	Instituto Geográfico do Exército
IGM	Instituto Geológico e Mineiro
IP	Índice de plasticidade
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i> – Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
LFJ	Almofadas planas de grande área
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Mi	Micaxistos
NMC	Nível de máxima cheia
NmE	Nível mínimo de exploração
NPA	Nível de pleno armazenamento
PK	Perfil ao quilómetro
PLT	<i>Point Load test</i> – Ensaio de compressão pontual
PRCIP	Perfil de resistividade eléctrica do circuito hidráulico de Padroselos
PSCIP	Perfil sísmico do circuito hidráulico de Padroselos
RCU	Resistência à compressão uniaxial
REC	Percentagem de recuperação em manobras de sondagens
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> (Bieniawski)
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> – Índice de recuperação modificado (Deere)
RSAEEP	Regulamento de Segurança a Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
SCIP	Sondagem do Circuito Hidráulico de Padroselos
SEG	Serviços de Engenharia e Geotecnia, S.A.
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i> – factor de redução pelas tensões (sistema Q)
STT	Defómetro tridimensional
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i> – Tuneladora

USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
X	Xistos

ÍNDICE DE MATÉRIAS

<u>AGRADECIMENTOS</u>	III
<u>RESUMO</u>	V
<u>ABSTRACT</u>	VII
<u>SIMBOLOGIA</u>	IX
<u>SIGLAS E ACRÓNIMOS</u>	XI
<u>ÍNDICE DE MATÉRIAS</u>	XIII
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	XVII
<u>ÍNDICE DE QUADROS</u>	XIX
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJECTIVOS E TRABALHOS REALIZADOS	1
1.2 - DEFINIÇÃO E RELEVÂNCIA	2
1.3 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA	7
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	9
2 - CIRCUITOS HIDRÁULICOS E ESTUDOS GEOTÉCNICOS	11
2.1 - METODOLOGIA GERAL.....	11
2.1.1 - RECONHECIMENTO	14
2.1.2 - PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA	18
2.1.2.1 - PROSPECÇÃO GEOFÍSICA	19
2.1.2.2 - PROSPECÇÃO MECÂNICA.....	20
2.1.3 - ENSAIOS	22
2.1.3.1 - <i>IN SITU</i>	22
2.1.3.2 - LABORATÓRIO	24
2.1.4 - ZONAMENTO GEOTÉCNICO	26
2.1.5 - CONSIDERAÇÕES GEOTÉCNICAS	27
2.1.5.1 - MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO.....	27
2.1.5.2 - MELHORAMENTO DE TERRENOS	30
2.2 - ESTRUTURAS DE TIPO TÚNEL/GALERIA.....	32
2.2.1 - OBJECTIVOS	32
2.2.2 - ESPECIFICIDADES.....	32
2.3 - ESTRUTURAS DE TIPO CANAL/CONDUTA	36
2.3.1 - OBJECTIVOS	36
2.3.2 - ESPECIFICIDADES.....	37
2.4 - ESTRUTURAS DE TIPO CAVERNA E POÇO.....	39
2.4.1 - OBJECTIVOS	39
2.4.2 - ESPECIFICIDADES.....	39

3 - ESTUDO DE CASO: CIRCUITO HIDRÁULICO DE PADROSELOS	43
3.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS	43
3.2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO REGIONAL	47
3.3 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO LOCAL	48
3.4 - GEOMORFOLOGIA	50
3.5 - TECTÓNICA, NEOTECTÓNICA E SISMICIDADE	52
3.5.1 - ENQUADRAMENTO TECTÓNICO	52
3.5.2 - NEOTECTÓNICA	53
3.5.3 - SISMICIDADE	55
3.6 - HIDROGEOLOGIA	60
4 - CARACTERIZAÇÃO E ZONAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR DO CIRCUITO	63
4.1 - CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE	63
4.2 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO E ENSAIOS GEOTÉCNICOS	64
4.2.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS	64
4.2.2 - SÍSMICA DE REFRACÇÃO	67
4.2.3 - PERFIS DE RESISTIVIDADES ELÉCTRICAS	68
4.2.4 - SONDAGENS MECÂNICAS	69
4.2.5 - ENSAIOS LUGEON	70
4.2.6 - ENSAIOS DILATOMÉTRICOS	75
4.2.7 - ENSAIOS LABORATORIAIS	76
4.3 - ZONAMENTO GEOTÉCNICO	81
4.3.1 - INFORMAÇÃO DE BASE	81
4.3.2 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	82
4.4 - ESTRUTURAS DO CIRCUITO HIDRÁULICO	87
4.4.1 - TOMADA DE ÁGUA E POÇO DE COMPORTAS	87
4.4.2 - TÚNEL DE ADUÇÃO	89
4.4.3 - CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	92
4.4.4 - CÂMARA DE VÁLVULA E GALERIA DE ATAQUE	93
4.4.5 - CONDUTA FORÇADA	94
4.4.6 - CENTRAL SUBTERRÂNEA: CAVERNA, GALERIA DE ATAQUE E POÇOS	95
4.4.7 - GALERIAS DE RESTITUIÇÃO	96
4.4.8 - ESTRUTURA DE RESTITUIÇÃO E TÚNEL DE ACESSO	97
4.5 - ESCAVAÇÕES E SUSTIMENTOS	98
4.5.1 - GENERALIDADES	98
4.5.2 - TOMADA DE ÁGUA	99
4.5.3 - GALERIA EM PRESSÃO	100

4.5.4 - POÇO DE COMPORTAS E CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	100
4.5.5 - CAVERNA DA CÂMARA DE VÁLVULAS E GALERIA DE ACESSO.....	101
4.5.6 - CONDUTA FORÇADA.....	102
4.5.7 - CENTRAL, GALERIAS DE ACESSO E POÇOS DE BARRAMENTOS	102
4.5.8 - RESTITUIÇÃO	103
4.6 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO COMPLEMENTARES	104
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO – PEÇAS DESENHADAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Quatro esquemas alternativos para circuitos hidráulicos (Broch, 1982; Lamas, 1993, adaptado).	4
Figura 1-2 – Diferentes arranjos de circuitos hidráulicos com centrais subterrâneas (Sousa, 2000).....	6
Figura 1-3 - Complexo subterrâneo do Alto Lindoso (Sousa <i>et al.</i> , 1994).....	9
Figura 2-1 – Zonamento do risco sísmico de Portugal Continental (RSAEEP, 1983).....	17
Figura 2-2 – Ábaco de Franklin (<i>in</i> Cenorgeo, sem data).....	29
Figura 3-1 – Ortofotomapa com a localização do circuito hidráulico e respectivas barragens (www.google.pt).....	43
Figura 3-2 - Barragem de Padroselos: planta geral (Cenorgeo, 2009c).....	44
Figura 3-3 - Localização e enquadramento da obra: excerto das unidades geotectónicas do NW Peninsular (segundo Ribeiro <i>et al.</i> , 1979; Farias <i>et al.</i> , 1987, modificados), sem escala.....	47
Figura 3-4 – Extracto da carta Geológica de Portugal, escala 1:50.000, Folha 6C-Cabeceiras de Basto (DGGM, 1992), sem escala.	48
Figura 3-5 - Extracto das Cartas Militares de Portugal, na escala 1: 25.000, Folhas 59 e 73 (IGE, 1997), sem escala.	51
Figura 3-6 - Extracto da Carta Neotectónica de Portugal Continental com a localização da obra (Cenorgeo, sem data), escala aproximada 1:1.000.000.	54
Figura 3-7 - Mapa de intensidades sísmicas com a localização da obra a vermelho,	57
Figura 3-8 - Parâmetros sísmicos para um período de retorno de 1000 anos	58
Figura 3-9 - Zonamento sísmico de Portugal Continental (Carvalho, 2007): Acção Sísmica Tipo 1, cenário de sismo afastado/sismo interplacas; Acção Sísmica Tipo 2, cenário de sismo próximo/sismo intraplaca; localização aproximada da obra com um círculo a rosa.	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1-1 – Alguns empreendimentos hidroeléctricos portugueses em funcionamento com centrais subterrâneas (Sousa, 2000, adaptado).....	3
Quadro 1-2 – Características de alguns empreendimentos hidroeléctricos com câmaras de equilíbrio com ar comprimido (Sousa, 2000, adaptado).....	5
Quadro 2-1 – Fases de projecto e actividades do estudo geotécnico (Oliveira, 1994, adaptado).	12
Quadro 2-2 – Valores do coeficiente de sismicidade, α (RSAEEP, 1983).	17
Quadro 2-3 – Técnicas de prospecção geofísica aplicáveis, em Portugal, no estudo de estruturas subterrâneas (USACE, 1994, adaptado).....	19
Quadro 2-4 – Principais ensaios de laboratório geralmente realizados em provetes obtidos em tarolos de sondagens (Silva, 2009a, 2009b; adaptados).	25
Quadro 2-5 – Principais classificações geomecânicas utilizadas em obras subterrâneas (Vallejo, 2002; Barton, 2002; Hoek, 2006; adaptados).	27
Quadro 2-6 – Algumas técnicas de tratamento/reforço em maciços rochosos (Oliveira, 2003, adaptado).....	31
Quadro 2-7 – Estudos de projecto para túneis (Oliveira, 1994, adaptado).	32
Quadro 2-8 - Métodos de desmonte em túneis em maciços rochosos (Bastos, 1998; Silva, 2009b; adaptados).	34
Quadro 2-9 – Abrasividade das rochas a partir do índice de Schimazeck (Vallejo, 2002, adaptado).	35
Quadro 2-10 – Abrasividade das rochas a partir do índice CAI (Vallejo, 2002, adaptado).	36
Quadro 2-11 – Estudos de projecto para canais/conduatas (Oliveira, 1994, adaptado).	36
Quadro 2-12 – Estudos de projecto para cavernas/poços (Oliveira, 1994, adaptado).....	39
Quadro 3-1 – Características gerais da barragem de Padroselos (Cenorgeo, 2009c, adaptado).	45
Quadro 3-2 - Características gerais dos órgãos de restituição da barragem de Daivões	45
Quadro 3-3 - Características gerais do circuito hidráulico de Padroselos (Cenorgeo, 2009c, adaptado).	46
Quadro 3-4 – Tipologia dos terrenos com vista à definição do coeficiente sísmico de referência, β_0 , para o aproveitamento hidráulico (RSAEEP, 1983).....	58

Quadro 3-5 – Intervalo de valores para a aceleração, velocidade e deslocamento produzidos por um sismo com um período de retorno de 1000 (Oliveira, 1977).....	59
Quadro 3-6 – Tipos de terrenos definidos de acordo com o EC8 (CEN, 2003).	60
Quadro 4-1 – Trabalhos de prospecção geofísica realizados na fase de estudo preliminar (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	65
Quadro 4-2 – Características das sondagens preliminares executadas (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	66
Quadro 4-3 – Profundidades do horizonte com velocidades $V_P > 2000$ m/s (Cenorgeo, 2009a).	68
Quadro 4-4 – Localização dos perfis de resistividade e respectivo comprimento (Cenorgeo, 2009a).	68
Quadro 4-5 – Estados de meteorização (ISRM, 1981).....	70
Quadro 4-6 – Grau de fracturação (ISRM, 1981).	70
Quadro 4-7 – Número de ensaios tipo Lugeon realizados em cada sondagens (Cenorgeo, 2009a).	70
Quadro 4-8 - Interpretação dos resultados dos ensaios tipo Lugeon (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	71
Quadro 4-9 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP1 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	72
Quadro 4-10 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP2 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	73
Quadro 4-11 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP3 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	74
Quadro 4-12 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP4 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).	75
Quadro 4-13 – Módulos dilatométricos médios em cada ciclo de carga (Cenorgeo, 2009a).	76
Quadro 4-14 – Resultados das massas volúmicas e porosidade num par de amostras de micaxistos (Cenorgeo, 2009a).	77
Quadro 4-15 – Características das amostras de quartzofilitos submetidas a ensaios de PLT (Cenorgeo, 2009a).	77
Quadro 4-16 – Índices de resistência à compressão médios obtidos nos ensaios de PLT (Cenorgeo, 2009a).	78
Quadro 4-17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e ultrassónicos em micaxistos (Cenorgeo, 2009a).	79

Quadro 4-18 – Resultados dos ensaios de perfurabilidade e de abrasividade em micaxistos ricos em quartzo (Cenorgeo, 2009a).....	80
Quadro 4-19 – Classificação da abrasividade para os ensaios realizados (Cenorgeo, 2009a).	81
Quadro 4-20 – Classificação da dureza para os ensaios realizados (Cenorgeo, 2009a).	81
Quadro 4-21 – Zonamento preliminar do maciço (Cenorgeo, 2009c, adaptado).	84
Quadro 4-22 – Percentagens das classes consideradas para o GSI e definidas nas sondagens (Cenorgeo, 2009b).	84
Quadro 4-23 – Valores de RMR em função das classes de qualidade do maciço (Cenorgeo, 2009b).	85
Quadro 4-24 – Características dos principais planos de descontinuidades (Cenorgeo, 2009b).	86
Quadro 4-25 – Parâmetros de resistência ao corte do maciço rochoso (Cenorgeo, 2009b).	87
Quadro 4-26 – Compartimentação do maciço na tomada de água (Cenorgeo, 2009b).	88
Quadro 4-27 – Horizontes geotécnicos na tomada de água (Cenorgeo, 2009b).	89
Quadro 4-28 – Compartimentação do maciço ao longo do túnel de adução, da tomada de água ao PK 1+450 (Cenorgeo, 2009b).	90
Quadro 4-29 – Compartimentação do maciço no túnel de adução, PK 1+450 à câmara da válvula de protecção (Cenorgeo, 2009b).	91
Quadro 4-30 – Compartimentação do maciço na chaminé de equilíbrio (Cenorgeo, 2009b).	92
Quadro 4-31 – Compartimentação do maciço ao longo da conduta forçada (Cenorgeo, 2009b).	95
Quadro 4-32 – Compartimentação do maciço no local da central (Cenorgeo, 2009b).	96
Quadro 4-33 – Compartimentação do maciço no túnel de acesso à central e túnel de restituição (Cenorgeo, 2009b).	97
Quadro 4-34 – Características dos trabalhos de prospecção previstos associados a cada uma das sondagens a realizar (Cenorgeo, 2009b, adaptado).	106

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - OBJECTIVOS E TRABALHOS REALIZADOS

Esta dissertação, elaborada no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa (FCT/UNL), tem como objectivo principal aplicar as metodologias de estudos geológicos e geotécnicos de circuitos hidráulicos utilizadas até à fase de anteprojecto a um caso real de estudo.

Deste modo, aborda a contribuição da Geotecnia para a caracterização do local a interessar por um potencial circuito de um aproveitamento hidráulico para produção de energia, que está frequentemente associado a obras subterrâneas lineares.

Por serem estruturas associadas a aproveitamentos hidráulicos com quedas de energia significativas, os circuitos hidráulicos em Portugal tendem a interessar maciços rochosos, em especial no caso de obras subterrâneas.

Na dissertação referenciam-se os diferentes tipos de circuitos hidráulicos subterrâneos, os respectivos problemas geotécnicos associados, bem como a condução dos estudos geotécnicos até à fase de anteprojecto detalhado, exclusive, com vista a determinar os parâmetros necessários ao adequado conhecimento e caracterização do sítio onde se prevê a implantação da futura obra, visando garantir a sua qualidade e segurança.

A mestranda realizou um estágio na empresa CENORGE – Engenharia Geotécnica, Lda., no período de Março de 2009 a Julho do mesmo ano, durante o qual acompanhou dois casos de estudos geotécnicos de circuitos hidráulicos subterrâneos, o primeiro referente ao aproveitamento hidroeléctrico de Gouvães e o outro ao de Padroselos, ambos no Alto Tâmega. Destes, serão detalhados apenas, devido ao tempo estipulado para a realização da dissertação, os estudos geológicos e geotécnicos para a implantação do circuito hidráulico associado ao aproveitamento de Padroselos, que se desenvolveu em duas fases, sendo que a primeira apenas foi realizada com o objectivo de orientar e sustentar a fase de estudos em curso, de anteprojecto.

Após a realização dos trabalhos previstos para a primeira fase e já depois de programados os trabalhos referentes ao anteprojecto, foi decidido suspender a realização deste empreendimento pelo dono de obra, a IBERDROLA, pelo que alguns dos trabalhos de

prospecção e ensaios previstos inicialmente foram suspensos, não tendo sido possível desenvolvê-los e apresentá-los.

Naqueles projectos a mestranda viu-se envolvida directamente no estudo da compartimentação do maciço, recorrendo ao programa de representação estereográfica, no hemisfério inferior, *Dips*, versão 5.1, da *Rocscience*®. Este estudo teve como objectivo a identificação de atitudes preferenciais de ocorrência da fracturação e xistosidade, que incluiu uma análise geral, a nível de ambos os circuitos, e outras detalhadas, para cada uma das estruturas em particular. Paralelamente apoiou ainda, pontualmente, a elaboração do zonamento geotécnico preliminar do maciço analisado.

1.2 - DEFINIÇÃO E RELEVÂNCIA

Um circuito hidráulico de um aproveitamento hidroeléctrico consiste num conjunto de estruturas que possibilitam que a água contida na albufeira de uma barragem possa produzir energia eléctrica de forma contínua, não poluente, sem elevado impacte ambiental e de modo relativamente económico, quando comparada com outras formas.

Os empreendimentos hidroeléctricos constituem um dos principais sistemas de produção de energia com recurso ao espaço subterrâneo, sendo uma das formas de maior penetração no sistema nacional de produção de energia eléctrica. O projecto destes empreendimentos depende, obviamente, das condições geotécnicas do local onde se pretende implantá-lo. Quando estas condições são adequadas, centrais subterrâneas combinadas com túneis de extensão variável são soluções frequentemente favoráveis pela minimização de impactes ambientais (Sousa, 2000) e maiores vantagens económicas quando comparadas com soluções à superfície.

A utilização de centrais hidroeléctricas tem vindo a ser implementada sempre que as condições geotécnicas e topográficas são adequadas ao anteprojecto detalhado deste tipo de obras (Sousa, 1983; Martins, 1985), uma vez que as mesmas apresentam as seguintes vantagens (Sousa, 2000):

- Economia;
- Maior segurança, do ponto de vista estrutural, contra eventuais sabotagens da estrutura;
- Menor impacto ambiental.

Um aproveitamento hidroeléctrico compreende (Wahlstrom, 1974): a barragem, para a armazenar água, a tomada de água para a captar e, em seguida, em regra um túnel de acesso, ou conduta forçada se a energia potencial da água na albufeira for muito significativa, a central hidroeléctrica, à superfície ou subterrânea, e associada a ela pode haver ainda uma chaminé de equilíbrio; segue-se a restituição em túnel, galeria e/ou canal. Este conjunto de obras permite o aproveitamento da energia da água, por desvio de um determinado caudal de um curso de água, onde a energia hidráulica correspondente ao desnível entre a tomada de água e a estrutura de restituição, é transformada em energia eléctrica. Alguns destes aproveitamentos são reversíveis, ou seja, permitem acumular água num reservatório ou albufeira por bombagem, utilizando energia nas horas de menor consumo, de modo a aproveitar a água assim acumulada para produção de energia em horas críticas do diagrama de carga do consumo de energia eléctrica (Sousa, 2000).

Em 1829 foi construída a central de *Snoqualmie Falls*, a primeira em caverna, nos Estados Unidos da América. Em 1895, a primeira central subterrânea em poço foi inaugurada em *Edward Dean Adam*, também nos Estados Unidos. Outros projectos se seguiram no início deste século, mormente na Alemanha, Suécia, França, Noruega e Itália (Myrset, 1982).

Em Portugal existe já um certo número de aproveitamentos hidroeléctricos com circuitos hidráulicos em subterrâneo, nomeadamente em aproveitamentos do Douro Internacional, nos sistemas Cávado-Rabagão, Alto Lindoso, Torrão e Venda Nova II (Quadro 1-1).

Quadro 1-1 – Alguns empreendimentos hidroeléctricos portugueses em funcionamento com centrais subterrâneas (Sousa, 2000, adaptado).

Designação	Rio	Ano	Dimensão da central (cxlxa)	Potência (MW)	Carga estática (m)
Salamonde	Cávado	1953	28x11,7x31,5	52	127
Cançada	Cávado	1955	40x18x30	60	121
Picote	Douro	1957	88x16,6x35	180	71
Miranda I	Douro	1960	80x19,6x42,7	156	53
Bemposta	Douro	1964	85x22x45	210	62
Távora	Távora	1965	71,5x16,2x26,3	64	461
Alto Rabagão	Rabagão	1965	44x18x42,8	140	170
Vilarinho das Furnas	Homem	1972	Poços: Ø=15,5; alturas = 16,5 e 31,75	64+2º grupo	416
Torrão	Tâmega	1988	Poços: Ø=17; alturas = 42,5	158	65
Alto Lindoso	Lima	1992	84x20,3x46	610	280
Miranda II	Douro	1995	Poço: Ø=25; altura = 66	180	70
Venda Nova II (reforço)	Rabagão	2001	60x20x30	135	420

Nas dimensões da central, as unidades são em metros; c – comprimento, l – largura e a – altura máxima.

No que diz respeito ao circuito hidráulico, existem vários esquemas alternativos para sistemas com centrais subterrâneas. Sistematizam-se na Figura 1-1 diferentes perfis que representam a evolução verificada na concepção destas obras (Broch, 1982; Lamas, 1993).

No esquema mais superior representado na Figura 1-1 o circuito hidráulico inclui uma estrutura na encosta que funciona como câmara de carga, instalada no término de um túnel de acesso, sendo depois a água conduzida, à superfície do terreno, em conduta forçada até à central. O aproveitamento de Venda Nova constitui um exemplo deste tipo de esquema em Portugal. Posteriormente, como se indica no esquema seguinte (Figura 1-1), passou-se a usar uma localização totalmente em subterrâneo das estruturas do circuito hidráulico, sendo a chaminé de equilíbrio constituída pela combinação de um poço vertical com uma câmara subterrânea horizontal, seguindo as águas para a central por um poço inclinado em betão armado ou com blindagem metálica, estando o complexo da central completamente inserido no subsolo. A evolução seguinte correspondeu à utilização de poços sob pressão sem revestimento ou com revestimento de regularização.

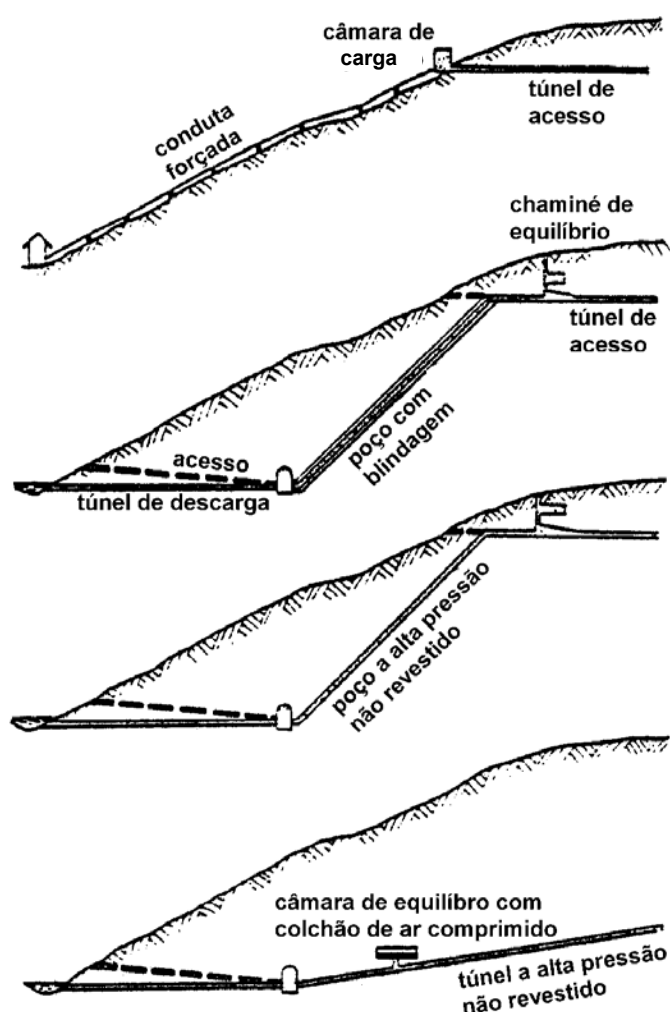


Figura 1-1 – Quatro esquemas alternativos para circuitos hidráulicos (Broch, 1982; Lamas, 1993, adaptado).

Nas últimas décadas do século passado, construíram-se alguns empreendimentos hidroelétricos utilizando poços não revestidos, mormente nos países escandinavos, com alturas médias de cerca de 450 m, atingindo mesmo valores da ordem de 1000 m (Lamas, 1993). Finalmente, refere-se a possibilidade de se efectuar uma ligação directa entre a tomada de água e a central, o que implica uma diminuição na extensão do circuito hidráulico. Esta situação ocorre no caso do empreendimento hidroelétrico de Venda Nova II (Lima *et al.*, 2001). Nesta última etapa de desenvolvimento, como a Figura 1-1 ilustra, iniciou-se a utilização de câmaras de equilíbrio de menores dimensões, parcialmente preenchidas com ar comprimido, em geral sob a forma de cavernas não revestidas com rocha de elevada qualidade e não permeável. O amortecimento do choque hidráulico é feito recorrendo à elevada compressibilidade do ar relativamente à da água.

O primeiro empreendimento com câmaras de equilíbrio com colchão de ar comprimido entrou em funcionamento em 1973 (Broch, 1982). Instalações deste tipo têm sido realizadas na Noruega, de que se cita o aproveitamento de *Ulla-Forre* (Walbo, 1982), e o aproveitamento de *Jukla*. No Quadro 1-2, sintetizam-se as características dos principais empreendimentos hidroelétricos com câmaras de equilíbrio com ar comprimido, todos eles executados na Noruega, com excepção do último, na China (Sousa e Menezes, 1993).

Quadro 1-2 – Características de alguns empreendimentos hidroelétricos com câmaras de equilíbrio com ar comprimido (Sousa, 2000, adaptado).

Local	Construída em	Capacidade da central (MW)	Altura de água (m)	Volume da caverna (m ³)	Volume de ar (m ³)	Pressão absoluta (MPa)	Perda de ar (Nm ³ /h)
Driva	1973	140	570	7350	2600-3600	4,0-4,2	1,3
Jukla	1974	35	180	6050	1500-5300	0,6-2,4	0,1-0,4
Oksla	1980	206	465	18.000	11.700-12.500	3,5-4,4	4,7
Sima	1980	500	1158	9500	4700-6600	3,4-4,8	1,0-2,3
Osa	1981	90	205	12.500	10.000	1,8-1,9	900/80 ⁺
Kvilldal	1981	1240	537	110.000	70.000-80.000	3,7-4,1	250/10 ⁺
Tafjord	1982	82	897	1950	1200	6,7-7,7	200
Brattset	1982	80	274	8900	5000-7000	2,3-2,8	13,4
Ulset	1985	37	338	4900	3200-3700	2,3-2,5	-1,2
Torpa	1989	150	475	12.000	10.000	3,8-4,4	-

De entre os vários esquemas apresentados anteriormente para circuitos hidráulicos existem vários arranjos possíveis, sobretudo relacionados com o desenvolvimento das partes dos circuitos a alta e a baixa pressões, sendo habitualmente classificados segundo três tipos principais (Figura 1-2):

- i) arranjo do tipo sueco ou com a central a montante - caso do Alto Lindoso;
- ii) arranjo do tipo alpino ou com a central a jusante - caso de Vilarinho das Furnas;
- iii) arranjo intermédio - caso das obras subterrâneas de Salamonde.

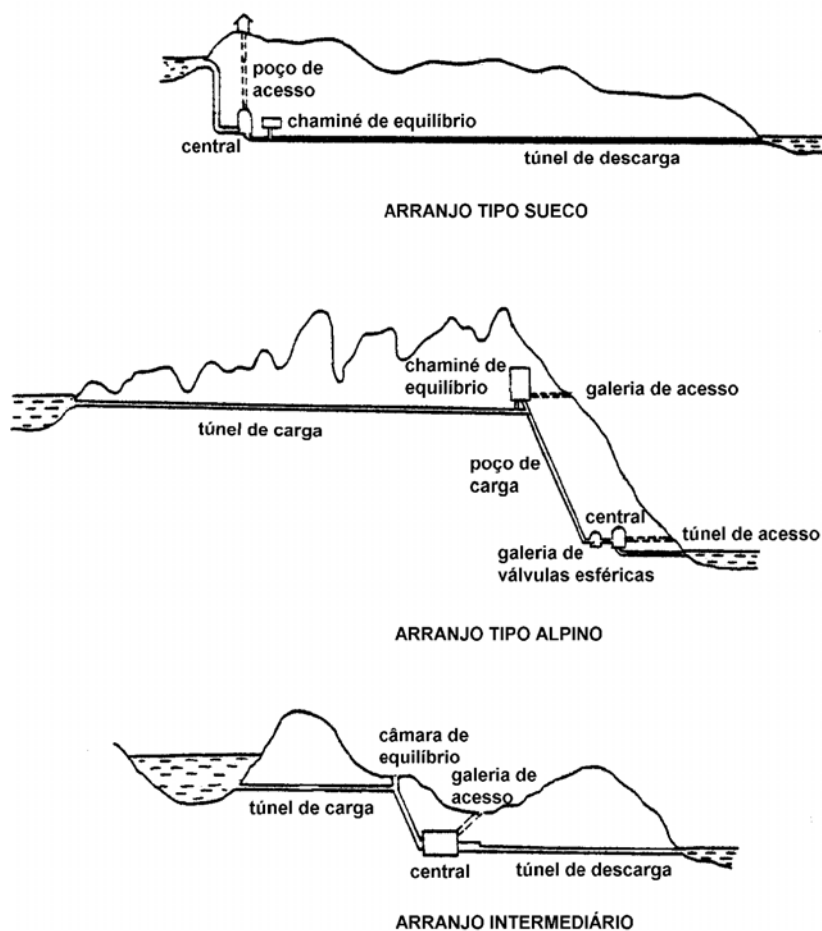


Figura 1-2 – Diferentes arranjos de circuitos hidráulicos com centrais subterrâneas (Sousa, 2000).

Como se mencionou anteriormente muitos destes aproveitamentos hidroelétricos são reversíveis. O anteprojecto detalhado do circuito hidráulico e da central não difere, no essencial, de um aproveitamento convencional havendo, no entanto, necessidade de dois reservatórios, um a montante e outro a jusante da central, e de turbinas geralmente reversíveis, para turbinagem e bombagem.

1.3 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A utilização de energia hidráulica para a produção de electricidade teve início, em Portugal, nos finais do século XIX. Os primeiros aproveitamentos, com algumas dezenas a poucas centenas de quilowatts, foram instalados na dependência de cursos de água mais ou menos permanentes, utilizando as quedas criadas pela construção de pequenos açudes, em alvenaria, sendo pouco mais que azenhas adaptadas com a instalação de dínamos (COBA e PROCESL, 2007).

Aqueles aproveitamentos alimentavam instalações industriais (têxteis, moagem, etc.) localizadas nas imediações das próprias centrais. Com o tempo, estas pequenas centrais isoladas começaram a alimentar a iluminação pública das povoações envolventes às instalações industriais, bem como algumas habitações (*op. cit.*, 2007).

Os aproveitamentos a fio-de-água, apresentavam uma produção muito irregular, o que justificava o facto de que em 1926, das 140 centrais de serviço público, só 25% serem hidroeléctricas, e destas só duas com mais de 5 MW de potência: Lindoso e Varosa, que alimentavam o Porto. Lisboa era alimentada por duas centrais térmicas com potências equivalentes, uma das quais propriedade da Carris. A maior parte das centrais era explorada por entidades privadas de pequena a média dimensão (*ib.*, 2007).

Então, a inexistência de uma rede de transporte interligada dificultava a exploração dos recursos nacionais, e o recurso a aproveitamentos a fio-de-água, muito irregulares, impedia a confiabilidade dos fornecimentos. A construção dos grandes aproveitamentos de albufeira, capazes de assegurar uma regularidade de produção conveniente, implicava investimentos avultados que só poderiam ser realizados com intervenção estatal.

Em meados da década de 30 foi dado um impulso significativo à construção de grandes aproveitamentos com a criação da Junta de Electrificação Nacional e a realização, sistemática, de estudos sobre a exploração das principais bacias nacionais (*ib.*, 2007).

A crise económica dos anos 30 e a 2ª Guerra Mundial dificultaram a implementação inicial, tendo o primeiro grande aproveitamento (Santa Luzia, no rio Unhais) com 24 MW de potência entrado em serviço apenas em 1942 (*ib.*, 2007). Na década seguinte entraram em funcionamento grandes aproveitamentos de albufeira nas bacias do Cávado e do Zêzere e, ainda, no Douro internacional (Miranda e Picote). A potência total instalada nestes

aproveitamentos (aproximadamente 1000 MW) permitiu triplicar a potência disponível até então.

Este foi o período de ouro da hidroelectricidade em Portugal, garantindo com abundância e segurança a satisfação da procura ligada a uma rede de consumo crescente. Em 1960 80% da potência instalada e 95% da energia eléctrica consumida no país era de origem hidroeléctrica.

Nesta década entraram ao serviço apenas três novos aproveitamentos, com uma potência total de 500 MW, tendo igualmente entrado ao serviço as primeiras centrais térmicas modernas (Tapada do Outeiro e Carregado).

Nas duas décadas seguintes, 70 e 80, respondendo à evolução dos consumos, são instalados mais 1500 MW de capacidade hidroeléctrica, incluindo a totalidade da cascata do Douro Nacional (800 MW). Nessas mesmas décadas foram instaladas duas centrais térmicas (Setúbal e Sines), tendo a potência térmica ultrapassado a potência hidroeléctrica disponível (3500 MW contra 3000 MW).

Ao longo dos anos 90 entraram em serviço mais cerca de 700 MW hídricos concentrados, essencialmente, no aproveitamento do Alto Lindoso (630 MW). Este aproveitamento hidroeléctrico salienta-se nos dias de hoje pela envergadura do seu circuito hidráulico, uma vez que apresenta a maior altura de queda desde sempre em aproveitamentos Portugueses (Figura 1-3), e nalguns pequenos aproveitamentos mini-hídricos. Ao longo dessa década, entraram também em serviço 1940 MW térmicos, concentrados nas centrais do Pego e da Tapada do Outeiro.

No século XXI, e até final de 2006, entraram ao serviço mais 500 MW hídricos, correspondentes essencialmente à central de Alqueva e à central de Frades, ambas equipadas com grupos reversíveis. No mesmo período entraram ao serviço mais 1650 MW térmicos, concentrados na central do Ribatejo (COBA e PROCESL, 2007).

Posteriormente o Governo português definiu a construção de uma série de aproveitamentos, nomeadamente a duplicação da capacidade das centrais do Alqueva, no Guadiana, e de Picote e Bemposta, no Douro, e a construção do aproveitamento de Ribeiradio, no Vouga.

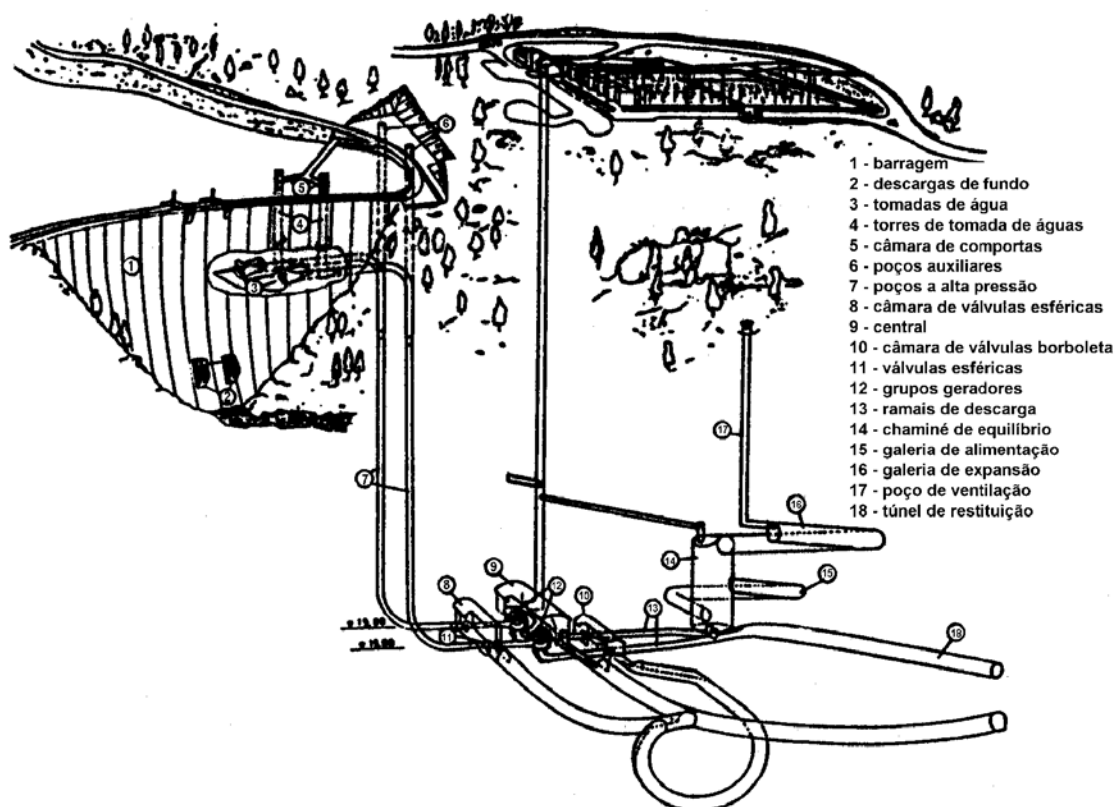


Figura 1-3 - Complexo subterrâneo do Alto Lindoso (Sousa *et al.*, 1994).

À data de elaboração desta dissertação projectam-se os aproveitamentos hidráulicos de Gouvães e Padroselos, Alto Tâmega, e Daivões, no rio Tâmega, para reforço da produção de energia hidroeléctrica em Portugal.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Os temas abordados no presente trabalho foram organizados em 5 capítulos, que se sintetizam em seguida:

Capítulo 1 – É feita uma breve introdução acerca dos objectivos pretendidos com a dissertação, define-se circuito hidráulico e apresentam-se as várias estruturas que integraram os subterrâneos, bem como uma breve evolução histórica dos aproveitamentos hidroeléctricos em Portugal.

Capítulo 2 – Integra as metodologias gerais adoptadas para o estudo geotécnico preliminar de circuitos hidráulicos em subterrâneo, desde os métodos de prospecção e ensaio, ao

zonamento geotécnico do maciço, bem como as metodologias relativas ao estudo particular de determinados aspectos geotécnicos associados a cada tipo de estrutura dos circuitos.

Capítulo 3 – Descreve o enquadramento geral do caso particular de anteprojecto do circuito hidráulico de Padroselos, no rio Tâmega, essencialmente em subterrâneo, com uma extensão de 3,8 km.

Capítulo 4 – Apresenta a caracterização e zonamento geotécnico preliminar para o caso de estudo anteriormente referido.

Capítulo 5 – Inclui as considerações finais do trabalho desenvolvido e propõem-se desenvolvimentos futuros.

Finalmente, encontram-se as referências bibliográficas consultadas para a execução desta dissertação, bem como o anexo de peças desenhadas que a complementam, cedidas pela empresa CENORGEO – Engenharia Geotécnica, Lda.

2 - CIRCUITOS HIDRÁULICOS E ESTUDOS GEOTÉCNICOS

2.1 - METODOLOGIA GERAL

De uma forma geral, um circuito hidráulico caracteriza-se como sendo uma obra linear, em túnel ou conduta, excepto no caso de estruturas particulares que o compõem, como são a tomada de água, poço de comportas, poço de cabos ou chaminé de equilíbrio, realizadas em poço, e a central hidroelétrica, que no caso de ser subterrânea, é construída em caverna.

A temática referente aos estudos geotécnicos para túneis, já foi largamente analisada por vários autores, como é o caso de Plasencia (2003), Vallejo (2002), Sousa (2000), Roxo (1995), Oliveira (1994), Zaruba e Mencl (1976) e Wahlstrom (1973), entre outros.

Segundo (Oliveira, 1975) e do ponto de vista geológico, os aspectos gerais mais importantes são a caracterização litológica dos terrenos, a respectiva estrutura, sobretudo no que se refere às fracturas que afectam o maciço, e as condições hidrogeológicas. Deverá incluir ainda a caracterização dos diferentes materiais rochosos, a geometria e a natureza da fracturação, os acidentes geológicos, as propriedades hidráulicas do maciço rochoso e sempre que necessário o estado de tensão inicial. Todos estes aspectos têm importância fundamental, quer na escolha do método de escavação mais indicado, quer na definição da necessidade e do tipo de sustimento ou de suporte. Devido às condições geológicas e geotécnicas exigidas por obras subterrâneas do tipo hidráulico, as mesmas só se realizam em maciços rochosos, caso contrário os custos associados a este tipo de obra disparariam.

Após a definição das características geológicas das formações que, em certos casos, poderá ser suficiente para o anteprojecto detalhado preliminar da obra, segue-se a caracterização geotécnica dos terrenos visando o seu zonamento geotécnico preliminar. Essa caracterização é, geralmente, efectuada com base em prospecção, geofísica e mecânica, complementada pela realização de ensaios, quer *in situ*, quer de laboratório.

As diferentes fases do anteprojecto detalhado, com o objectivo de caracterizar com um grau crescente de detalhe e exactidão a natureza e o comportamento geotécnico do local de implementação da obra, bem como as respectivas actividades envolvidas, estão definidas no Quadro 2-1.

Quadro 2-1 – Fases de projecto e actividades do estudo geotécnico (Oliveira, 1994, adaptado).

Fases	Actividades
Estudo prévio	Recolha bibliográfica Fotografia aérea e imagens de satélite Reconhecimento geológico de superfície Primeiros trabalhos expeditos de prospecção
Anteprojecto e Anteprojecto detalhado	Prospecção geofísica e mecânica Ensaio <i>in situ</i> Ensaio em laboratório Zonamento geotécnico
Construção	Cartografia da escavação Registo de ocorrências em obra Observação do comportamento Controlo de qualidade Prospecção em frentes de avanço Ensaio <i>in situ</i> Análises de risco geotécnico
Manutenção	Observação

A fase de estudo prévio baseia-se na recolha bibliográfica e reconhecimento de superfície do local a interessar pela obra, tendo por objectivo a cartografia geológica de superfície preliminar e definição inicial do traçado da obra.

A fase de anteprojecto detalhado é normalmente antecederida por uma fase de anteprojecto, onde se iniciam os trabalhos de prospecção e ensaios que posteriormente são complementados na fase de anteprojecto detalhado ou seja, entre estas duas fases aumenta a exactidão da informação obtida e a sofisticação/custo mais elevado dos métodos de prospecção e ensaios utilizados com vista ao zonamento geotécnico do maciço e a respectiva classificação geomecânica.

Como referido anteriormente (Capítulo 1), um aproveitamento hidroeléctrico compreende um conjunto de estruturas que permitem o aproveitamento da energia da água, e a sua transformação em energia eléctrica. Em geral este tipo de obras engloba um conjunto de estruturas que envolvem aberturas subterrâneas de túneis extensos ou de cavernas, com critérios de concepção e de cálculo necessariamente diferenciados, implicando um conhecimento mais ou menos completo das condições geológicas e geotécnicas dos maciços rochosos que interessam.

Seguidamente distinguem-se para os diferentes tipos de obra associadas a um circuito hidráulico, como central subterrânea, túneis a baixa pressão e de acesso, poços e túneis a alta pressão, chaminé de equilíbrio e tomada de água, os aspectos geotécnicos relevantes para o respectivo anteprojecto detalhado (Sousa, 1983; Martins, 1985; Brekke e Ripley, 1987; Lamas, 1993):

i) Complexo subterrâneo da central – É constituído por um conjunto de obras subterrâneas que nestes empreendimentos assumem um papel determinante, dado constituírem a parte fundamental do anteprojecto detalhado e da concretização destas obras. Daí que seja necessário um acesso directo à zona do maciço rochoso onde se situam as cavernas, tendo em vista o estudo dos acidentes geológicos e da fracturação do maciço rochoso, a determinação do estado de tensão *in situ* e a caracterização da deformabilidade, resistência e condutividade hidráulica. O anteprojecto detalhado das obras envolve, fundamentalmente, as etapas correspondentes à selecção do local mais adequado do ponto de vista de estabilidade, à definição dos eixos de orientação das aberturas e das suas formas e o seu dimensionamento.

ii) Túneis a baixa pressão e de acesso - Apresentam um grande desenvolvimento linear e pequeno diâmetro, não sendo necessário uma prospecção muito completa do maciço, cuja caracterização é, em geral, obtida à custa de informação colhida em sondagens, às vezes bastante afastadas. Os estudos a empreender devem ser essencialmente conduzidos no sentido de definir os critérios de classificação do maciço e as respectivas classes de comportamento. A identificação dessas classes visará, para cada caso, definir métodos construtivos e sustimentos mais adequados.

iii) Poços e túneis a alta pressão – Apresentam um grande desenvolvimento e pequeno diâmetro aplicando-se igualmente as considerações referidas em ii). No entanto, como o escoamento ocorre sob pressões elevadas, é da maior relevância o conhecimento rigoroso das propriedades do maciço, visando analisar o comportamento global da estrutura composta pelo maciço e pelo suporte, no caso de obras revestidas. Ensaios hidromecânicos devem geralmente ser realizados.

iv) Chaminés de equilíbrio – Em regra apresentam desenvolvimento vertical predominante, consistindo em poços, em que se desenvolvem equilíbrios tridimensionais. Poderão, eventualmente, estar inseridas no complexo subterrâneo da central. Especial atenção deve ser dada às obras com ar comprimido, sob a forma de caverna, tendo presente os requisitos já enunciados anteriormente no subcapítulo 1.2.

v) Tomadas de água e bocas de montante e jusante – São obras que interessam uma zona do maciço em regra mais perturbado e meteorizado, por ser mais superficial, tornando-se necessário efectuar uma prospecção geotécnica mais completa e ter especial atenção aos métodos construtivos a adoptar, bem como ao respectivo dimensionamento.

Neste capítulo abordam-se, seguidamente, a metodologia geral de estudos geotécnicos associados a estas obras, assim como as especificidades associadas a cada tipo de estrutura dos circuitos hidráulicos (túnel/galeria, canal/conduto, caverna e poços), mencionando os principais aspectos geotécnicos a estudar em cada uma das fases de estudo a ser contempladas nesta dissertação - estudos prévio e anteprojecto, uma vez que as fases de anteprojecto detalhado, construção e manutenção extravasam o objectivo em prossecução.

2.1.1 - Reconhecimento

Neste subcapítulo referem-se as técnicas de recolha bibliográfica e reconhecimento de superfície, como métodos preliminares a adoptar na fase inicial dos estudos ao adequado conhecimento do maciço rochoso.

A recolha bibliográfica é a primeira etapa quando se inicia o estudo prévio de um local para a implantação de uma obra geotécnica. Tem como objectivo a recolha de toda a informação existente relativa à região a afectar, no que respeita à geologia, local e regional, geomorfologia, hidrogeologia, sismicidade, tectónica e estudos geotécnicos anteriormente realizados. Toda a informação recolhida representa uma mais-valia para o reconhecimento de superfície que será posteriormente realizado. O estudo dessa informação permite realizar trabalhos de investigação com informação de base para o estudo geológico da zona e a previsão da sua evolução geomorfológica, em consequência das obras a construir. Em certos casos, a análise dos elementos disponíveis poderá permitir minimizar ou dispensar a realização de alguns tipos de trabalhos complementares (Cenorgeo, sem data).

Actualmente, recorre-se com frequência à interpretação fotogeológica de fotografias aéreas coloridas que permitem ainda a obtenção de um número mais elevado de informações e maior rigor nas interpretações.

O estudo da fotografia aérea ou imagens de satélite permitem localizar nesta fase de estudo, por exemplo, antigos escorregamentos, falhas, áreas de subsidência ou fissuras,

como também fenómenos que produzem ligeiras alterações na drenagem local, resultando em pequenas alterações de cor e distribuição da vegetação.

Do estudo cuidado destas fotografias que, em zonas de carência de mapas topográficos de pormenor, constituem ainda excelente meio de orientação, sobretudo em zonas pouco povoadas, podem obter-se diversas informações, das quais se destacam, pela sua importância geotécnica:

- a distribuição dos diferentes tipos de rocha, solos e vegetação;
- aspectos estruturais dos maciços, tais como orientação de estratos, da xistosidade e de outros tipos de lineações;
- aspectos geomorfológicos com relevo para zonas de antigos escorregamentos e de erosão;
- características de drenagem da zona, em regra em correspondência com os aspectos estruturais mais importantes dos maciços;
- características de humidade nos terrenos.

Apesar da qualidade das informações que podem prestar, os estudos fotogeológicos nunca dispensam um reconhecimento no terreno; em certos casos, contudo, a informação obtida reduz substancialmente as tarefas de reconhecimento directo.

Após a recolha e análise dos elementos existentes e da interpretação das fotografias aéreas de uma dada região, há que proceder ao reconhecimento de campo abrangendo sempre maior área do que a directamente interessada pela obra, de modo a permitir uma ideia correcta das características geológicas regionais (Cenorgeo, sem data).

Em muitas situações, o primeiro reconhecimento de superfície permite já tomar decisões importantes, por exemplo, no que se refere às orientações mais adequadas para as obras em função da estrutura geológica das formações. Além disso, só após um reconhecimento adequado que permita definir contactos, alinhamentos tectónicos, tipo de terrenos, etc., é possível preparar um programa de trabalhos de prospecção ajustado aos problemas a estudar (Oliveira, 1975).

A finalidade do reconhecimento é, em grande parte dos casos, a elaboração de cartografia litológica e estrutural preliminar, numa escala adequada ao tipo, dimensão das obras e fase de estudo. De um modo geral, em problemas de Geotecnia, nunca se utiliza escala inferior a 1:25.000 no estudo prévio, sendo frequente o uso de cartografia a escalas 1:1 000 e 1:500, ou até maior, na fase de anteprojecto detalhado. Na elaboração destas cartas haverá que

utilizar as ferramentas tradicionais de levantamento (bússola, martelo, etc.) e, com frequência, proceder à limpeza de vegetação e de depósitos que mascaram completamente as características das formações que se pretende estudar (*op. cit.*, 1975), em especial no estudo de zonas mais superficiais, como as bocas de montante e jusante de túneis.

Em trabalhos de grande importância procede-se às vezes ao saneamento do terreno, isto é, à remoção total da vegetação, dos depósitos de vertente e da camada de alteração das formações que ocorrem no local. Após estes trabalhos, o uso de fotografia terrestre pode prestar informações de grande valor. Aliás, muitas vezes, é difícil substituir esta informação por mapas ou esboços, ainda que muito pormenorizados (*ib.*, 1975).

Mas o reconhecimento não comporta apenas a caracterização dos aspectos geomorfológicos, litológicos e estruturais. São igualmente importantes as características hidrogeológicas dos maciços, bem como indícios de actividade de falhas na região (*ib.*, 1975).

No que se refere à hidrogeologia, nem sempre é fácil obter informações com interesse antes de se proceder à realização de trabalhos de prospecção. Contudo, em zonas povoadas é, em regra, possível fazer uma análise muito satisfatória das características hidrogeológicas das formações superficiais presentes a partir do cadastro cuidado de poços e de outras captações existentes, em função da época do ano em que são realizadas as observações, de níveis aquíferos, caudais, artesianismo, etc. Atendendo às necessidades cada vez maiores de água de boa qualidade, em consequência do desenvolvimento demográfico das regiões, a caracterização hidrogeológica do maciço prende-se com a necessidade de não contaminar as águas subterrâneas pela execução da obra.

Outro aspecto de relevo na consideração da estabilidade de obras de engenharia é o da caracterização da actividade sísmica. Segundo o Regulamento de Segurança a Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP, 1983) para efeitos da quantificação da acção dos sismos considera-se o país dividido em quatro zonas que, por ordem decrescente de sismicidade, são designadas por A, B, C e D (Figura 2-1).

A influência da sismicidade é traduzida por um coeficiente de sismicidade, α , cujos valores são indicados no Quadro 2-2 e que afectará os parâmetros de aceleração obtidos para cada uma das acções sísmicas consideradas, tipo I (sismo interplacas) ou tipo II (sismo intraplaca) visando a definição dos sismos de projecto, a que se sobreporão ainda os efeitos locais do terreno, definidos em consonância com o referido Regulamento. Acresce que,

actualmente e em função das alterações propostas no âmbito do Eurocódigo 8 – EC8 (CEN, 2003), adaptações a esta abordagem podem ser introduzidas, embora ainda seja vinculativo o especificado no RSAEEP (1983).

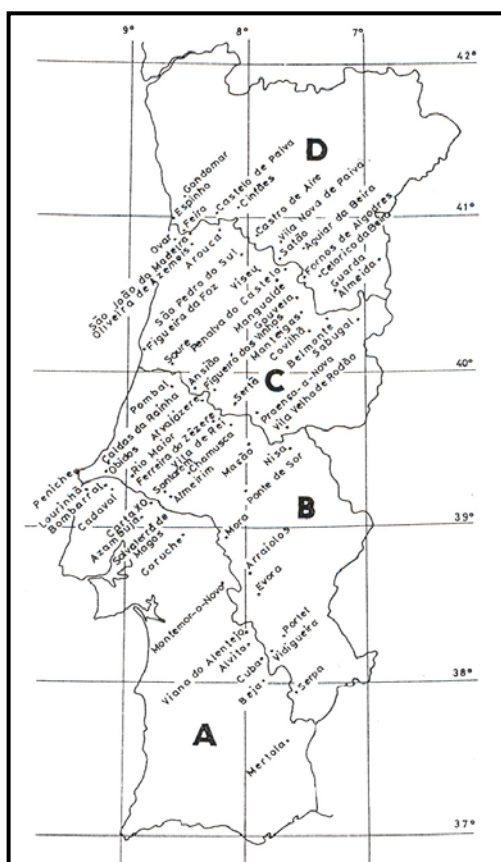


Figura 2-1 – Zonamento do risco sísmico de Portugal Continental (RSAEEP, 1983).

Quadro 2-2 – Valores do coeficiente de sismicidade, α (RSAEEP, 1983).

Zona sísmica	α
A	1
B	0,7
C	0,5
D	0,3

Após a consideração de todos os aspectos atrás enunciados e a elaboração de uma síntese baseada no reconhecimento segue-se, para a generalidade das obras, a elaboração de uma proposta para um programa de prospecção geotécnica preliminar que, por razões de eficiência e economia, se deve iniciar por uma prospecção geofísica à qual se seguirá campanha de prospecção mecânica adequada à natureza das formações e ao tipo de estruturas em referência.

2.1.2 - Prospekção geotécnica

Define-se prospekção geotécnica do local de uma futura obra como o conjunto de operações que visam determinar a natureza e características do terreno, sua disposição e estruturas com interesse para essa obra (Cenorgeo, sem data).

A campanha de trabalhos de prospekção geotécnica é definida visando a recolha do máximo de informação possível para que, seguidamente com base nessa nova informação disponível, seja elaborado um zonamento geotécnico preliminar para o maciço e sejam definidos quais os parâmetros mais relevantes para a classificação geomecânica de cada zona e para as análises de estabilidade a realizar (Oliveira, 1994).

A escolha dos métodos mais adequados, a selecção dos locais para a realização dos trabalhos e a definição das quantidades de trabalho requerem, para além de um adequado conhecimento das técnicas geotécnicas disponíveis, conhecimento dos processos de análise e dos processos construtivos de túneis/conduitas/canais, incluindo os métodos de melhoramento dos terrenos, tais como injeções, drenagens, *jet grouting*, ancoragens, pregagens, etc. (*op. cit.*, 1994).

Os trabalhos de prospekção geotécnica iniciam-se, muitas vezes, pela prospekção geofísica (quando a espessura a estudar é inferior à centena de metros) seguindo-se os trabalhos de prospekção mecânica e ensaios *in situ*. Finalmente, sucedem-lhes os ensaios de laboratório.

Devem ser utilizados inicialmente métodos mais expeditos que permitem o conhecimento de maiores áreas, e realizar um maior número de ensaios nas fases de estudo preliminar e de anteprojecto, de forma a obter um elevado número de valores, aplicar métodos estatísticos e obter ordens de grandeza das propriedades em estudo. Ulteriormente, recorre-se a métodos cada vez mais sofisticados mas também, por sua vez, mais dispendiosos, que permitirão ter valores mais exactos das propriedades geotécnicas em análise e a utilizar nos modelos numéricos da fase de anteprojecto detalhado.

Sintetizam-se, seguidamente, os principais métodos de prospekção geofísica e mecânica aplicados nestas obras, assim como as informações essenciais obtidas.

2.1.2.1 - Prospeccção geofísica

A prospecção geofísica efectua medições indirectas, a partir da superfície do terreno ou no interior de furos de sondagem, obtendo desta forma informações do subsolo, generalizadas, através da análise e interpretação das medições efectuadas (USACE, 1994). As técnicas de prospecção geofísica aplicáveis no projecto de obras subterrâneas são apresentadas no Quadro 2-3.

Quadro 2-3 – Técnicas de prospecção geofísica aplicáveis, em Portugal, no estudo de estruturas subterrâneas (USACE, 1994, adaptado).

Método	Princípio	Aplicações	Limitações	Custo comparativo*
Gravimétrico	Densidade dos terrenos	Variações laterais de litologia; localização de cavernas ou outras cavidades	Não fornece medição directa da geometria do corpo anómalo	Intermédio
Magnetométrico	Intensidade magnética do campo total	Presença de corpos metálicos enterrados; cartografia de condutas soterradas; detecção de falhamento e intrusões ígneas menores	Não fornece a medição directa da geometria do corpo anómalo	Baixo a médio
Resistividade eléctrica	Resistividade eléctrica relativa dos terrenos	Prospecção de corpos metálicos; detecção de zonas argilificadas; localização de aquíferos e depósitos arenosos; estudo local de evolução de características em profundidade	Resultados ambíguos	Médio
Electromagnético	Amplitude e o ângulo de fase do campo electromagnético	Localização de aquíferos; fluxos de água	Aplicação restrita; resultados ambíguos	Baixo a médio
Refracção sísmica	Velocidade de propagação de ondas sísmicas induzidas em ponto de impacto	Profundidade do 'firme'; configuração e continuidade das interfaces entre horizontes sísmicos; velocidade de propagação das ondas P e S	Fraco em declives elevados ou com estruturas muito perpendiculares à linha de base; pouco económico em trabalhos pequenos	Médio a elevado
Reflexão sísmica	Velocidade de propagação de ondas sísmicas induzidas em ponto de impacto	Profundidade e continuidade das camadas; contactos estratigráficos; localização de descontinuidades	Velocidade de calibração requerida para determinação de profundidades	Elevado a muito elevado

* dos diferentes métodos listados.

Os métodos utilizados constituem uma mais-valia para melhorar o programa de prospecção, uma vez que permitem, consoante a técnica, uma rápida, embora aproximada, localização e correlação de características geológicas do subsolo, como sendo estratigrafia, litologia, descontinuidades diversas, presença de água, ou medição da densidade do terreno *in situ*, bem como do seu módulo de elasticidade dinâmico, quando necessário (*op.cit.*, 1994).

O uso criterioso destes métodos permite reduzir a necessidade de prospecção mecânica e, desta forma, diminuir os custos inerentes à fase de estudos geotécnicos, obtendo-se no entanto o máximo de informação acerca das formações interessadas. No entanto, deve-se ter em atenção que os resultados obtidos por eles não são absolutos e devem ser comparados e validados com dados de superfície e/ou de métodos directos de investigação, ponderando devidamente as limitações e domínios de aplicação das diversas metodologias.

2.1.2.2 - Prospecção mecânica

Designa-se de prospecção mecânica pelo facto de, na sua execução, serem utilizados meios mecânicos. Estes trabalhos realizam-se devido à necessidade de penetrar nos maciços para confirmar determinadas características, função, do tipo de problema em causa (Cenorgeo, sem data).

A escolha do método a utilizar depende, essencialmente do tipo de formação geológica, da fase de estudo em que se insere, da espessura dos terrenos de cobertura e do tipo de ensaios *in situ* que se pretendem realizar no maciço.

A prospecção mecânica pode incluir poços, valas e/ou galerias, mas é a execução de sondagens mecânicas à rotação carotadas, o método mais utilizado e importante no reconhecimento geotécnico. Esta técnica possui grandes vantagens, uma vez que contacta directamente com o local em profundidade de execução da obra, possibilitando ainda a realização de ensaios e recolha de tarolos de onde se obtêm amostras para ensaios em laboratório. As desvantagens que lhe estão associadas, prendem-se com o seu elevado custo e com o facto de se tratar de uma amostragem pontual, carecendo de interpretação cuidada na elaboração dos respectivos perfis geotécnicos (Bastos, 1998).

As sondagens mais utilizadas para o estudo de túneis são as de furação convencional à rotação com recolha contínua de amostra, sendo o sistema de furação “wire-line” o mais adequado para furos com largas dezenas de metros, uma vez que neste sistema o

amostrador é içado pelo interior das varas de furação sem que estas tenham de ser retiradas (Plasencia, 2003). A sua localização deve ser estabelecida criteriosamente, baseada nos trabalhos de reconhecimento e de prospecção geofísica previamente executados, e devem estar distribuídas sempre que possível ao longo de todo o alinhamento do traçado. O número de sondagens depende principalmente do comprimento do túnel, dos tipos litológicos presentes, da estrutura geológica do maciço e da espessura de recobrimento. Considera-se satisfatório que em formações de complexidade moderada, o somatório do comprimento dos metros furados seja da ordem de grandeza do comprimento dos túneis (Vallejo, 2002). Oliveira (1975), propõe para o espaçamento entre sondagens cerca de 50 m, podendo alcançar os 500 m no caso de túneis muito longos, em terrenos de geologia relativamente simples. Segundo Deere (1969 *in* Rodrigues-Carvalho, 1981), para túneis, de um modo geral, deverão ser realizadas pelo menos cinco sondagens; três no seu desenvolvimento e uma em cada um dos emboquilhamentos. Rodrigues-Carvalho (1981) sugere também que, para recobrimentos da ordem de 100 m, o espaçamento entre as sondagens realizadas varie entre 30 a 150 m; para profundidades entre 100 e 150 m, um espaçamento de 150 a 300 m; e no caso de profundidades superiores a 250 m, um espaçamento entre 300 a 750 m. Quando a complexidade é elevada, as ordens de grandeza apontadas poderão não ser suficientes.

Existem técnicas aplicadas à realização de sondagens que permitem a recolha de características estruturais do maciço; para a atitude das discontinuidades, utiliza-se a técnica dos tarolos orientados por marcação da sua atitude no terreno a partir da superfície. No que se refere às características físicas das discontinuidades (abertura e enchimento), utiliza-se mais raramente a técnica da amostragem integral, e geralmente recorrem-se a diagrfias, com equipamentos que permitam visualizar as paredes, como câmaras fotográficas e de vídeo, entre outros.

Às vezes a necessidade de acesso directo às formações geológicas interessadas pela construção de túneis, quer para observação geológica directa detalhada, quer para, em fase posterior, proceder à realização de ensaios *in situ* para determinação de características mecânicas ou hidráulicas dos terrenos, conduz, em certas situações, à abertura de poços e galerias apesar do seu custo, em regra bastante elevado (Oliveira, 1975).

Os poços são sobretudo utilizados nos locais onde se localizam estruturas com desenvolvimento vertical, como são a chaminé de equilíbrio, poço de cabos, etc., podendo também ser executados ao longo do túnel nos pontos de menor recobrimento sendo

aproveitados, em regra, na fase de obra, como zonas de acesso, de arejamento e de extracção de material.

As galerias de prospecção são sobretudo realizadas para funcionamento como galerias-piloto ao longo dos alinhamentos de túneis. A sua abertura, contudo, implica, de um modo geral, uma série de pressupostos nomeadamente que a localização definitiva esteja definida com grande probabilidade a partir de outros métodos de estudo mais expeditos. Além de permitir a observação detalhada das paredes e tecto, incluindo os aspectos hidrogeológicos dos maciços, elemento muito importante para este tipo de obras, e de servirem para a realização de ensaios *in situ* de caracterização geotécnica das formações, estas galerias têm a vantagem de poderem ser incorporadas no túnel a construir, diminuindo o volume de escavação em fase de obra e facilitando o desmonte dos respectivos terrenos (Oliveira, 1975).

2.1.3 - Ensaaios

2.1.3.1 - *In situ*

Neste âmbito far-se-á apenas referência aos ensaios *in situ* usualmente realizados na fase de prospecção mecânica aproveitando os trabalhos de furação, nomeadamente sondagens, listando-se apenas os ensaios de permeabilidade e de deformabilidade, habitualmente realizados na fase de anteprojecto e que contribuem para se obter o zonamento geotécnico preliminar do maciço.

Os ensaios de determinação do estado de tensão virgem do maciço, sempre que necessários, apenas se incluem na fase de anteprojecto detalhado, pelo que não serão abordados neste trabalho, podendo ser consultados em Vallejo (2002).

a) Ensaaios de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade realizado em maciços rochosos é o de absorção de água sob pressão tipo Lugeon. Este ensaio realiza-se, em regra, durante a execução dos furos de sondagem, por injeção nos respectivos furos. Normalmente é efectuado em trechos de comprimento reduzido, devendo esse comprimento ser escolhido em função das características das formações geológicas, nomeadamente estado de fracturação e variação litológica. Atendendo a que as características de permeabilidade das formações são sobretudo relevantes nas zonas envolventes do túnel é frequente restringir a zona a ensaiar

a uma extensão que não ultrapassa 5 vezes o diâmetro previsto para o túnel, considerando-se dois diâmetros a cima e outro abaixo do túnel (Oliveira, 1975).

Este ensaio permite obter informação quanto à permeabilidade equivalente, ao regime de percolação, e ao comportamento das fracturas na envolvente do trecho ensaiado.

A experiência mostrou que, para valores de coeficiente de absorção inferiores a uma unidade Lugeon (Lu), é impossível injectar qualquer calda de cimento, pelo que foi considerado que um maciço rochoso é “impermeável” sempre que se obtiverem valores pelo menos iguais àquele.

A unidade Lugeon corresponde um valor de coeficiente de permeabilidade equivalente para o maciço (k) de 10^{-5} cm/s para sondagens de diâmetros entre 5 e 10 cm (Cenorgeo, sem data).

Em regra, estes ensaios vão sendo realizados à medida que o furo vai prosseguindo, em trechos de comprimento variável, conforme a permeabilidade do maciço e a capacidade da bomba de injeção, mas mais geralmente com 3 a 5 m. Neste caso, o limite inferior do trecho é o fundo do furo, no momento do ensaio, e o limite superior definido pela posição de um obturador de couro ou borracha que tem por missão impedir que a água injectada no furo se escape entre o obturador e a parede respectiva (Cenorgeo, sem data). A pressão máxima de ensaio tende a ser um quarto da tensão efectiva àquela profundidade.

b) Ensaios dilatométricos

O estudo preliminar da deformabilidade em maciços rochosos é efectuado recorrendo a dilatómetros, existindo vários tipos em funcionamento, entre os quais se destaca o desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Este ensaio utiliza furos de diâmetro 76 mm (NX), corrente em trabalhos de prospecção geotécnica. O critério para a definição da zona do maciço a ensaiar com o dilatómetro é idêntico ao referido para o ensaio de permeabilidade.

O dilatómetro consta de um cilindro de aço envolvido por uma membrana de borracha, que pela injeção de água sob pressão no equipamento permite a expansão da membrana às paredes do furo. O ensaio consiste, no mínimo, em três ciclos de carga e descarga com, pelo menos, cinco incrementos de carga em cada ciclo, sendo conveniente aplicar a máxima carga possível. No fim de cada incremento ou diminuição de pressão lêem-se as

deformações em quatro direcções. Considera-se o ensaio concluído quando as deformações estabilizam para diferentes pressões (Cenorgeo, sem data).

Relativamente aos ensaios a realizar na fase de anteprojecto detalhado para determinação da deformabilidade do maciço podem contemplar:

- Ensaio de hidrofracturação;
- Ensaio de carga em placa;
- Ensaio com macaco tradicional;
- Ensaio com almofadas planas de grande área (LFJ).

Uma vez que estes ensaios extravasam o âmbito deste trabalho, os mesmos podem ser consultados em Vallejo (2002) e Oliveira & Charrua-Graça (*in* Bell, 1987).

2.1.3.2 - Laboratório

Os ensaios laboratoriais fornecem informações básicas sobre as propriedades físicas e mecânicas da rocha intacta e ajudam a classificá-la, permitindo que seja comparada com outros tipos de rocha. Embora os ensaios laboratoriais possam fornecer dados que podem ser usados para projectos em maciços rochosos, o mais prudente é obter esses dados através de ensaios *in situ*.

Sobre as amostras colhidas a partir das sondagens mecânicas à rotação carotadas, realizam-se ensaios em laboratório com a finalidade de serem avaliadas as características mecânicas da rocha ou solo constituinte do maciço, bem como avaliar a sua escavabilidade.

Os ensaios geralmente efectuados em amostras rochosas estão sintetizados no Quadro 2-4. Neste conjunto, os dois últimos listados ainda não são efectuados por laboratórios portugueses, embora sejam internacionalmente utilizados na avaliação da potencialidade de desmonte por meios mecânicos potentes (tuneladoras ou roçadoras) em estruturas lineares subterrâneas que se desenvolvam em maciços rochosos.

Quadro 2-4 – Principais ensaios de laboratório geralmente realizados em provetes obtidos em tarolos de sondagens (Silva, 2009a, 2009b; adaptados).

Ensaio	Princípio	Aplicação	Limitações	Provetes	Normas
Compressão pontual (PLT)	Aplicação de carga pontual na direcção axial/diametral do provete, progressivamente crescente, até que se verifique a rotura do mesmo	Índice de resistência ou índice de compressão pontual ($I_{s(50)}$) da rocha	Ensaio expedito, aproximação grosseira de σ_c ; apenas deve ser efectuado em provetes cujas dimensões não permitam avaliação de RCU	Regulares ou irregulares	ASTM D 5731; ISRM, 1985
Compressão uniaxial	Aplicação de carga axial ao provete, progressivamente crescente, até ocorrer a rotura do mesmo	Resistência à rotura (σ_c) da rocha - RCU; módulo de deformabilidade (E_r); coeficiente de Poisson (ν)	Geometria, volume e paralelismos das faces do provete	Prismáticos ou cilíndricos; altura deve ser 2 a 3 > que lado da base ou diâmetro	ASTM D7012; ISRM, 1979; ISRM, 1999
Triaxial	Aplicação de tensão deviatória ($\sigma_1 - \sigma_3$) ao provete, crescente, até à rotura	Resistência à rotura (σ_c) da rocha; coesão (c); ângulo de atrito (ϕ) da rocha	Pressão confinante; medição pressão intersticial e temperatura; presença de microfissuras	Cilíndricos	ASTM D7012; ISRM, 1978a
Tracção brasileiro	Carregamento, segundo 2 geratrizes opostas, de provete de comprimento suficientemente pequeno para que estado de tensão seja plano	Resistência à tracção das rochas (σ_t) por compressão diametral	Ensaio expedito, aproximação de σ_t	Cilíndricos; relação mínima altura/espessura do provete	ASTM D3967; ISRM, 1978b
Ultrassons	Transmissão de impulso dinâmico ao provete e medição do tempo que leva a atravessar o seu comprimento, L	Módulo de deformação elástico (E_d); avaliação estado de alteração / porosidade da rocha	Estrutura interna, dimensão relativa dos grãos/provete; porosidade e inclusões podem limitar a aplicação	Cilíndricos ou prismáticos	ASTM D2845 ISRM, 1978c
Deslizamento de diaclases	Aplicação de forças, uma normal e outra tangencial, em provete com diaclase colocado entre duas meias caixas de aço	coesão aparente (c_a) e ângulo de atrito (ϕ) da diaclase	Rugosidade do plano de descontinuidade	De preferência, quadrado com uma área mínima de 2500 mm	ASTM D5607
Índice Schimazek / Abrasividade Cerchar	Estudo petrográfico / medição diâmetro (décimas de mm) de agulha de aço após ter sulcado 1cm em 1s ao longo da superfície do provete	Índices de Schimazek e de abrasividade Cerchar, classe de dureza	Não disponível em Portugal	Regulares ou irregulares	UNE-22 950-3
Perfurabilidade	Ensaio de fragmentabilidade e de perfuração por broca de tungsténio	Índice de perfurabilidade, DRI (<i>Drilling rate index</i>)	Não disponível em Portugal; os provetes devem encontrar-se o mais são possível	Diâmetro de tarolos no mínimo de 32 mm	-

2.1.4 - Zonamento geotécnico

O zonamento geotécnico é uma etapa fundamental dos estudos geotécnicos e visa definir volumes de terreno com idênticas características geotécnicas, que respondam de modo semelhante a solicitações impostas, a curto e longo prazo. Na elaboração de um zonamento geotécnico, deve atender-se por um lado, à selecção e hierarquização dos parâmetros a utilizar; e, por outro, à distribuição e cálculo dos valores característicos de cada zona definida (Pistone, 1989).

De um modo geral o zonamento, ainda que possa ser baseado em apenas um parâmetro, deverá contemplar diversos, que podem ou não estar relacionados entre si. Estes parâmetros devem (*op. cit.*):

- a) ser simples, representativos e facilmente verificáveis durante a construção;
- b) representar o grau de complexidade do maciço;
- c) permitir uma descrição quantitativa das propriedades e acções ocorrentes no maciço.

Desta forma e no caso de estruturas subterrâneas, os métodos de desmonte, técnicas de melhoramento a aplicar e os sustimentos serão semelhantes ao longo de cada zona definida. Para o efeito recorre-se, geralmente, à aplicação de classificações geotécnicas de maciços rochosos e as diferentes zonas definidas são caracterizadas a partir de um conjunto variável de parâmetros geotécnicos derivados com base nos resultados do reconhecimento e dos métodos de prospecção e ensaios geotécnicos utilizados.

As classificações geomecânicas (Quadro 2-5) constituem, actualmente, uma ferramenta essencial no âmbito daquele procedimento, uma vez que permitem, de uma forma rápida e relativamente económica e como o seu nome indica, derivar os principais parâmetros geotécnicos que comandam o comportamento geomecânico dos maciços e, algumas delas, estimar os sustimentos a aplicar em túneis (Vallejo, 2002, adaptado). Saliente-se que a sua aplicação é particularmente indicada na obtenção do zonamento geotécnico preliminar do maciço, sendo que posteriormente não dispensam o uso de métodos numéricos de cálculo, mas já no âmbito da fase de anteprojecto detalhado.

O Quadro 2-5 inclui uma breve síntese daquelas classificações que são utilizadas com mais frequência para obter a caracterização geomecânica de maciços rochosos; contudo, considera-se que o pormenorizar da respectiva descrição extravasa os objectivos pretendidos para esta dissertação, podendo ser consultado nas fontes ali citadas. Acresce que o índice GSI pode ser obtido a partir do índice RMR (se $RMR > 25$) ou de uma simplificação do índice Q (se $RMR < 25$), conforme detalhado em Hoek (2006).

Quadro 2-5 – Principais classificações geomecânicas utilizadas em obras subterrâneas (Vallejo, 2002; Barton, 2002; Hoek, 2006; adaptados).

Classificação	Fonte	Parâmetros considerados	Informação derivada
<i>Rock Mass Rating, RMR</i>	Bieniawski (1989)	- RCU da rocha; - RQD (conforme definido por Deere, 1989); - Espaçamento das descontinuidades; - Condições das descontinuidades (abertura, continuidade, rugosidade, condições das paredes e presença de enchimentos); - Condições de percolação de água.	Qualidade do maciço rochoso; coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso; módulo de deformabilidade do maciço; período de auto sustentação; tipos de sustimento; método de escavação.
Sistema Q	Barton (2002)	Tamanho dos blocos: (RQD/J _n); Resistência ao corte das diaclases: (J _r /J _a); Tensão activa: (J _w /SRF).	Qualidade do maciço rochoso; módulo de deformabilidade do maciço; definição do sustimento e do revestimento.
<i>Geological Strength Index, GSI</i>	Marinos <i>et al.</i> (2005); Hoek (2006)	Descrição da estrutura e das condições superficiais do maciço.	Qualidade do maciço rochoso; módulo de deformabilidade do maciço; coesão e ângulo de atrito do maciço; resistência da rocha intacta.

2.1.5 - Considerações geotécnicas

2.1.5.1 - Métodos de escavação

Os critérios de classificação do maciço rochoso de acordo com a respectiva escavabilidade, destinam-se a avaliar a capacidade do maciço de ser desagregado segundo um método e/ou equipamento. Estes critérios não contemplam os restantes factores que podem limitar o emprego das técnicas seleccionadas, como os factores ambientais, económicos, geográficos, estruturais, de perigo, ou mesmo a geometria das cavidades (Oliveira, 2003).

A selecção do tipo de desmonte a aplicar (o mecânico ou com explosivos, ou seja, o convencional), deve considerar os parâmetros mecânicos característicos do maciço a interessar, e podem ser faseados. A sua escolha reflecte-se sempre na qualidade final e nos custos e prazos inerentes à sua realização. Neste contexto, existem alguns requisitos a ter em conta, nomeadamente o tipo e versatilidade dos equipamentos, podendo estes constituir um factor limitativo para os empreiteiros, em termos de concurso, influenciando directamente o custo da obra.

Entende-se por escavabilidade/ripabilidade de um maciço rochoso, a sua capacidade de resistência à acção proporcionada pelos equipamentos de escavação, tanto os mecânicos como os convencionais. Esta apetência do maciço para ser desmontado, é um factor determinante nas fases de anteprojecto e de anteprojecto detalhado.

Ao longo dos tempos, vários autores têm desenvolvido critérios de classificação dos maciços rochosos em função da sua escavabilidade. Estes critérios baseiam-se em diversos parâmetros, existindo alguns de avaliação simples e outros que incorporam um largo conjunto de características dos materiais e de equipamentos propostos. A escavação de maciços rochosos depende, maioritariamente, de duas características principais do maciço: a resistência da rocha e as características (geométricas e físicas) das diferentes fracturas que o seccionam.

Os parâmetros utilizados pelos diversos autores, tendem a reflectir estas duas características do maciço, incorporando factores como as resistências à compressão uniaxial (RCU) e à tracção, velocidade de propagação das ondas sísmicas, grau de meteorização, abrasividade e dureza das rochas, espaçamento de diaclases, RQD (Deere, 1989), RMR (Bieniawski, 1989), parâmetros do sistema de classificação Q (Barton, 2002), orientação, continuidade e preenchimento de diaclases, possança média dos estratos e tamanho de blocos do maciço, entre outros.

Em seguida, indicam-se os métodos gerais utilizados no desmonte de maciços rochosos, seleccionados em função dos elementos disponíveis para o zonamento geotécnico, sendo que, mais adiante (subcapítulos 2.2 e 2.4), se indicam os métodos aplicados especificamente na escavação de túneis/galerias, cavernas e poços. Em qualquer situação, as variações nas características de deformabilidade do maciço e eventuais zonas de afluência preferencial de água são de sobremaneira condicionantes da metodologia e faseamento dos trabalhos a adoptar.

a) Processos mecânicos

Os métodos de desagregação mecânica do material rochoso, devido à sua diversidade, devem ser escolhidos essencialmente pela sua adequação, flexibilidade, disponibilidade e alargado campo de utilização, de forma a reduzir o número de equipamentos em obra.

Assim, para a selecção de um método mecânico apropriado, não são suficientes os critérios de escavabilidade e o zonamento geotécnico usual, carecendo a sua escolha de estudos de pormenor que integrem as tecnologias existentes à data e as restrições específicas do meio e da obra, nomeadamente as condições geotécnicas (Bastos, 1998). Em alguns casos, podem-se utilizar sistemas mistos, de explosivos e arranque mecânico.

Das técnicas gerais disponíveis para desmonte mecânico de maciços rochosos destacam-se, do mais sofisticado para o mais simples:

- Tuneladoras (*Tunnel Boring Machines*, TBM): escavam o maciço em secção total, circular, com recurso a um conjunto de cortadores dispostos numa cabeça de corte rotativa de diâmetro igual ao da escavação a empreender; podem ou não ser dotadas de escudos.
- Roçadoras: meio de ataque pontual que escava o maciço com recurso a uma cabeça de corte, adequada a material de mais fracas características geotécnicas.
- Ripper: tractores com lagartas, equipados com um ou vários elementos pontiagudos, designados escarificadores ou *rippers*, que desmontam o maciço rochoso.
- Escavadoras: para escavação directa de materiais pouco consolidados, e carga de materiais previamente fragmentados por outros métodos.

No caso da aplicação das cartas de ripabilidade, obtém-se valores médios que relacionam, por um lado a capacidade de desmonte de um tipo de máquina, com a velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais (ondas P) e as litologias atravessadas, por outro. Assim, por exemplo, para um ripper médio, D9, tem-se:

Velocidades das ondas P até 1500 m/s, maciço escavável;

Velocidades das ondas P de 1500 a 2000 m/s, maciço ripável;

Velocidades das ondas P superiores a 2500 m/s, desmonte com explosivos.

A partir da resistência à compressão uniaxial e do espaçamento das discontinuidades, pode distinguir-se a necessidade de escavação convencional da mecânica (Figura 2-2).

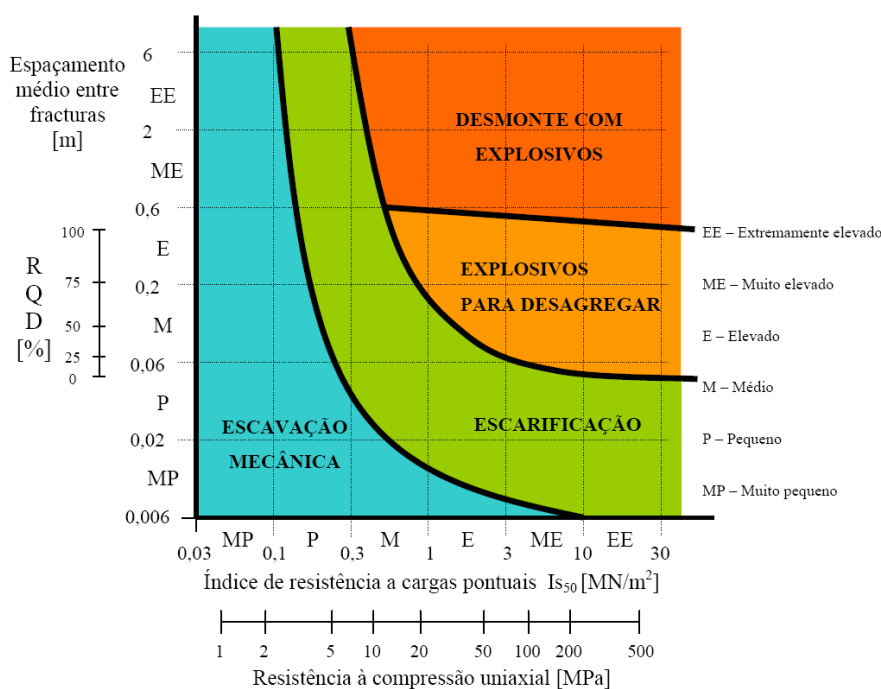


Figura 2-2 – Ábaco de Franklin (*in* Cenorgeo, sem data).

Pode ainda estimar-se, de forma aproximada, a facilidade de escavação com recurso a roçadora, em função da resistência à compressão uniaxial da rocha, σ_{ci} , e da sua resistência à tracção, σ_t (Vallejo, 2002):

- Rochas facilmente escaváveis: $\sigma_t / \sigma_{ci} < 0,1$;
- Rochas dificilmente escaváveis: $\sigma_t / \sigma_{ci} > 0,1$.

b) Explosivos

Neste caso, devem-se estabelecer cenários de utilização com base nos elementos existentes, no que respeita a diagramas de fogo, tipo de explosivo a utilizar, espaçamento entre furos, consumo específico de explosivo e tempos de retardo. Os referidos cenários devem cingir-se à adaptação às diversas litologias e resistências dos maciços rochosos envolvidos, bem como às situações peculiares que se verifiquem em termos da ocupação existente e restrições ambientais.

As limitações associadas ao uso de explosivos devem-se, fundamentalmente, às condições do meio onde se desenrolam as actividades. Estas condicionantes podem estar relacionadas com a presença de estruturas civis ou com o ambiente natural existente, potencialmente afectados pelas vibrações, ruídos, poeiras e projecção de blocos.

Relativamente às situações ambientais, a utilização de explosivos através da fracturação que induz ao maciço, pode afectar cursos de água, bem como aquíferos existentes, rebaixando-os ou ligando diferentes níveis. Estes efeitos podem limitar o uso do solo da região, tanto no que se refere a posteriores construções como as relativas ao uso agrícola, pecuária, fauna e flora (zonas protegidas), etc., além de acarretarem perigos e custos acrescidos para as actividades construtivas futuras.

2.1.5.2 - Melhoramento de terrenos

O reforço e o tratamento de maciços têm, entre outros objectivos, a melhoria da estabilidade, trabalhabilidade, o aumento da resistência e do comportamento do maciço durante a sua escavação, modificando a redistribuição normal do estado de tensão e/ou de outras características geotécnicas ou hidráulicas, de forma a garantir a execução da obra (Oliveira, 2003).

A escolha das técnicas a aplicar são definidas em fase de anteprojecto detalhado, tendo por base o conhecimento dos parâmetros geotécnicos do maciço; não obstante, considera-se que o pormenorizar da respectiva descrição ultrapassa os objectivos pretendidos para esta dissertação. O factor custo é também importante na selecção dos métodos, comparativamente com o benefício que terão na obra, e em função do tempo disponível para a sua implementação. Acresce, ainda, que a disponibilidade de equipamento por parte do empreiteiro também poderá condicionar a técnica a utilizar.

De seguida, listam-se algumas técnicas de melhoramento existentes no mercado para obras subterrâneas (Quadro 2-6), e o respectivo objectivo de cada uma delas, sendo que uma síntese destes podem ser consultados em Oliveira (2003) ou Vallejo (2002).

Quadro 2-6 – Algumas técnicas de tratamento/reforço em maciços rochosos (Oliveira, 2003, adaptado).

Técnica		Metodologia
Drenagem e rebaixamento do nível freático		Drenagem do afluxo de água à escavação, segundo método função das características hidrogeológicas do maciço, da profundidade e da importância da obra; objectivo primordial é controlar as pressões intersticiais e/ou arraste de materiais.
Injecções de caldas	Baixas pressões (permeação)	Introdução no terreno de caldas (geralmente de cimento) sob pressão que vão preencher fissuras e vazios existentes no maciço, melhorando as condições hidráulicas, de resistência e/ou de deformabilidade.
	Altas pressões (<i>jet grouting</i>)	Utilização de injectores (um a três) que mediante a injeção de ar/água com pressão elevada desagregam a estrutura do terreno natural e, depois, lhe misturam calda de cimento, dando origem a um material de características resistentes mais elevadas e de menor permeabilidade; podem-se incluir no seu seio outros elementos (fibras de vidro ou varões metálicos, por exemplo).
Ancoragens		Introdução de cabos de aço no maciço que, mediante uma força tractiva que lhe é aplicada entre os seus extremos, vai solidarizar o terreno, aumentando a sua resistência; contemplam, geralmente, a injeção de caldas de cimento ou de resinas, consoante a durabilidade para que estão dimensionadas.
Pregagens		Introdução de barra de aço no maciço e solidarizada a este por meio de resinas/caldas, dependendo de movimento para activar a sua acção de reforço.
Cambotas metálicas		Reforço de maciço de fraca qualidade, pela sua resistência, durabilidade e facilidade de instalação. Normalmente são associadas a outros tipos de suporte, como betão projectado, malha de aço, etc. São fabricadas de acordo com a secção do túnel e, posteriormente, montadas no local, por aparafusamento, de forma a constituírem um arco de sustimento.
Betão projectado		Cimento, areia e agregados finos, combinados com água, que são aplicados e compactados em jacto sob pressão, dinamicamente, frequentemente associado a ancoragens, pregagens e/ou malha de aço/fibras.

2.2 - ESTRUTURAS DE TIPO TÚNEL/GALERIA

2.2.1 - Objectivos

A caracterização geotécnica do maciço onde se prevê a implementação de um circuito hidráulico com recurso a túneis e galerias, é feita em diferentes fases de estudo, com o objectivo de determinar, com um grau crescente de detalhe, a natureza e o comportamento do terreno face à execução da estrutura.

Neste subcapítulo, os túneis e galerias são abordados em conjunto, uma vez que os aspectos geotécnicos a caracterizar para ambos são os mesmos; varia apenas o seu diâmetro, inferior no caso das galerias e, portanto, perturbando menos o maciço durante a sua construção.

As diferentes fases do projecto e os respectivos objectivos estão definidos no Quadro 2-7.

Quadro 2-7 – Estudos de projecto para túneis (Oliveira, 1994, adaptado).

Fases	Finalidades
Estudo prévio	Localização do túnel/galeria; Seleção do traçado.
Anteprojecto e Anteprojecto detalhado	Classificação geomecânica; Localização dos emboquilhamentos; Definição dos métodos de escavação; Definição dos sustimentos; Melhoramento de terreno; Plano de monitorização.

A fase de anteprojecto detalhado é normalmente antecedida por outra de anteprojecto, onde se iniciam os trabalhos de prospecção e ensaios que posteriormente são complementados naquela, ou seja, entre estas duas fases varia a exactidão da informação obtida e sofisticação/custo mais elevado dos métodos de prospecção utilizados; consequentemente, aumenta a fiabilidade e o nível de conhecimento atingido.

2.2.2 - Especificidades

No estudo de um túnel/galeria existem aspectos geotécnicos particulares do maciço que interessa caracterizar, são eles:

- permeabilidade;

- deformabilidade;
- estado de tensão virgem;
- escavabilidade;
- estabilidade da escavação.

Apenas alguns deles são avaliados na fase de anteprojecto, como se descreve em seguida.

a) Permeabilidade

A permeabilidade do maciço é um parâmetro condicionado pela litologia, estrutura do maciço e acidentes tectónicos, e é com base na execução do ensaio de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon (subcapítulo 2.1.3.1), que podem ser definidas as necessidades técnicas e adequar o tratamento a utilizar no maciço em estudo.

b) Deformabilidade

Outro parâmetro também importante no caso de obras subterrâneas, é a deformabilidade do maciço (ver subcapítulo 2.2) uma vez que, quanto maior o módulo de deformabilidade, menor a deformabilidade apresentada pelo maciço rochoso. Quando este parâmetro é conhecido, é possível definir o método de sustimento mais adequado a utilizar para a estrutura.

c) Estado de tensão

O estado de tensão do maciço é estudado na fase de anteprojecto detalhado e constitui outro dos factores a quantificar neste tipo de obras. Utilizam-se diferentes métodos a profundidades que podem atingir largas dezenas de metros como refere Vallejo (2002).

d) Escavabilidade

Outro parâmetro que importa caracterizar é a escavabilidade do maciço, e é importante analisá-lo, uma vez que o método de escavação a implementar, é definido consoante a resistência da rocha, dureza e abrasividade, características da fracturação do maciço e índices de qualidade, geomecânicos.

No mercado existem várias técnicas de escavação que podem ser aplicadas na abertura de túneis e galerias. Consoante se pretenda realizar uma obra subterrânea em terrenos brandos ou em maciços rochosos competentes, com desenvolvimento sub-horizontal ou

não, com grande ou pequena secção, longe ou perto de zonas urbanas. Assim, recorrem-se a métodos de escavação e equipamentos significativamente distintos.

A selecção do tipo de sistema de desmonte a aplicar (mecânico ou convencional), deve ter em conta aspectos como a altura do nível freático acima da soleira do túnel, o recobrimento, a distância do eixo do túnel às estruturas pré-existentes (construções, rios, etc.) e a sua sensibilidade, bem como os parâmetros mecânicos característicos do maciço a escavar.

No Quadro 2-8 apresentam-se as várias técnicas disponíveis, bem como as respectivas vantagens e limitações.

Quadro 2-8 - Métodos de desmonte em túneis em maciços rochosos (Bastos, 1998; Silva, 2009b; adaptados).

Método	Fundamento	Vantagens	Limitações
Explosivos	Perfuração do maciço, enchimento dos furos com material detonante e sua ulterior detonação; possibilidade de uso de microretardos e/ou pré-corte.	Método muito flexível; facilidade em executar sondagens de avanço e diagrfias a partir da frente de escavação; cominuição da rocha facilita a sua remoção e transporte.	Baixo rendimento; eventual sobreescavação; vibrações induzidas; ruídos, gases, poeiras e projecção de material (partículas e/ou blocos); eventual perturbação do maciço remanescente por sobrefracturação.
Tuneladoras	Máquinas de escavação que consiste numa coroa de corte ajustável à face do túnel, que ao rodar a uma velocidade constante e ao ser empurrada contra a frente da escavação, vai desmontando o maciço.	Elevados rendimentos (até 5 vezes superiores aos métodos convencionais); diversos tipos de cortadores adaptáveis a diversos materiais.	Elevados custos iniciais, sendo rentável em túneis longos; caso de túneis abaixo do nível freático poderá haver problemas de estabilidade importantes; implicam uma grande área de estaleiro junto aos emboquilhamentos; maciço deve ser pouco heterogéneo, em especial no que respeita à deformabilidade; desgastes anormais das peças de corte implicam paragens de substituição.
Roçadoras	Máquina de escavação pontual por recurso a uma cabeça de corte, a adequar consoante o material a escavar, situada num braço com relativa amplitude de movimentos.	Melhor eficácia em rochas brandas; tipos de cabeça adaptáveis aos diversos materiais rochosos.	Escavação de terrenos rochosos apenas com resistência à compressão média, no máximo.

Os diferentes métodos de escavação para obras subterrâneas foram abordados por Bastos, (1998) que poderá ser consultado com o objectivo de aprofundar este tema; tal não será aprofundado nesta dissertação, por se considerar que os mesmos extravasam os objectivos principais de investigação em prossecução.

Para a caracterização da escavabilidade e, consequentemente, conhecimento dos parâmetros que lhe estão associados, e que foram referidos anteriormente, é realizada prospecção geofísica, baseada nos mais variados métodos já anteriormente referidos, ou recorre-se também à técnica das diagrfias em furos de sondagem, úteis no estudo da

estratificação, litologia, densidade, alteração e porosidade da rocha, detecção de eventuais cavidades ou da presença de água, avaliação de módulos dinâmicos e velocidade das ondas sísmicas. Estas informações são complementadas pelas obtidas na prospecção mecânica, nomeadamente:

- realização de valas nas zonas de emboquilhamento, na altura dos trabalhos de reconhecimento, para a verificação de contactos, acidentes tectónicos, etc.;
- poços e galerias são pouco utilizados em túneis, uma vez que os poços só se justificam em grandes empreendimentos, coincidindo com os do próprio circuito;
- sondagens à rotação, sendo importante a localização de uma sondagem em cada emboquilhamento e poço (caso exista) e na totalidade, para um túnel de dificuldade média, um valor aproximado para o comprimento acumulado de furação por sondagens de pelo menos metade do comprimento total do túnel, como se referiu anteriormente (ver subcapítulo 2.1.2.2).

É ainda fundamental a realização de ensaios de abrasividade, determinantes para averiguar da aplicação de tuneladoras ou roçadoras como método de escavação. Neste contexto, a escavabilidade do maciço rochoso (Quadros 2-9 e 2-10) pode ser avaliada a partir da abrasividade da rocha (ver Quadro 2-4) caracterizada pelos índices de Schimazek - F_{Schim} (Quadro 2-9) e de abrasividade Cerchar - CAI (Quadro 2-10). O primeiro é calculado da seguinte forma (Vallejo, 2002):

Índice de Schimazek:

$$F_{Schim} = Q \cdot d_{50} \cdot \sigma_t \quad (\text{eq. 2.1})$$

sendo,

F_{Schim} – coeficiente de abrasividade (N/mm);

Q – conteúdo em quartzo equivalente dos minerais abrasivos (%);

d_{50} – diâmetro médio do grão de quartzo (mm);

σ_t – resistência à rotura por tracção, ensaio brasileiro (N/mm², ou seja MPa).

Quadro 2-9 – Abrasividade das rochas a partir do índice de Schimazeck (Vallejo, 2002, adaptado).

Abrasividade - F (kPa/cm)	Roçagem
0,2 – 0,3	Muito Boa
0,3 – 0,4	Boa
0,4 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,6	Regular
0,6 – 0,8	Fraca
0,8 – 1,0	Muito fraca

Quadro 2-10 – Abrasividade das rochas a partir do índice CAI (Vallejo, 2002, adaptado).

CAI (índice de abrasividade Cerchar)	Classificação
>4,5	Extremamente abrasiva
4,25 – 4,5	Altamente abrasiva
4,0 – 4,25	Abrasiva
3,5 – 4,0	Moderadamente abrasiva
2,5 – 3,5	Abrasividade média
1,2 – 2,5	Pouco abrasiva
<1,2	Muito pouco abrasiva

d) Estabilidade da escavação

Outro dos parâmetros que interessa caracterizar é a estabilidade da escavação, pelo que interessa conhecer as características geométricas e mecânicas das descontinuidades, as condições de percolação de água no maciço, entre outras. Para o efeito são utilizadas técnicas de prospecção anteriormente apresentadas no subcapítulo 2.1.

Após a realização da campanha de prospecção visando a caracterização geotécnica dos terrenos com vista ao seu zonamento, procede-se à aplicação de classificações geomecânicas (subcapítulo 2.1.4) que, nomeadamente, relacionam os resultados obtidos com o tipo de sustimento que melhor se adequa às características da obra.

2.3 - ESTRUTURAS DE TIPO CANAL/CONDUTA

2.3.1 - Objectivos

Neste subcapítulo os canais e condutas são abordados em conjunto, uma vez que os aspectos geotécnicos a caracterizar para estes dois tipos de estrutura são semelhantes.

As diferentes fases de projecto e os respectivos objectivos estão definidos no Quadro 2-11.

Quadro 2-11 – Estudos de projecto para canais/condutas (Oliveira, 1994, adaptado).

Fases	Finalidades
Estudo prévio	Localização do canal/conduta; Seleccção do traçado.
Anteprojecto e Anteprojecto detalhado	Zonamento geotécnico; Métodos de escavação e fundação; Estabilidade de taludes; Melhoramentos de terreno.

2.3.2 - Especificidades

No estudo de um canal/conduto existem aspectos geotécnicos particulares que interessa caracterizar, são eles:

- Ripabilidade;
- Resistência da fundação e fenómenos de subpressão;
- Estabilidade dos taludes de escavação.

a) Ripabilidade

A ripabilidade é um parâmetro importante a analisar, uma vez que o método de escavação a utilizar é definido consoante a natureza, compacidade, estrutura e resistência do material. Para a determinação deste parâmetro é realizada prospecção geofísica, baseada nos métodos de sísmica de refração (que fornece informação relativamente à escavabilidade e estado de meteorização do maciço), e prospecção mecânica baseada, fundamentalmente, na realização de valas pelo eixo do canal (que permitem a observação directa do maciço até uma profundidade limitada e ainda a recolha de amostras e a realização de ensaios *in situ*), bem como algumas sondagens à rotação carotadas (cujos tarolos possibilitam a realização de ensaios laboratoriais) e estudo do nível freático.

Consoante as características do maciço rochoso, os métodos de escavação que se utilizam podem ser mecânicos (escavadora e/ou ripper) ou por explosivos.

b) Resistência da fundação

A resistência da fundação é outro dos parâmetros a determinar. No entanto, quer os canais, quer as condutas, encontram-se fundados ao longo de toda a sua extensão basal directamente no maciço, induzindo geralmente pequenas cargas. Desta forma, dependendo das características resistentes da fundação serão definidas, ou não, medidas de reforço da mesma. Contudo, existem situações a acautelar no caso de condutas forçadas, que podem requerer análises mais cuidadas nas zonas de maciços de amarração, onde pode haver transmissão de tensões normais e tangenciais elevadas.

Nos canais, o fenómeno das subpressões que é originado pela percolação de água através do maciço, pode colocar em risco de rotura a respectiva soleira. Este fenómeno deve ser estudado tendo por base o conhecimento do nível freático no maciço, sua posição e variações sazonais, assim como a estrutura interna do mesmo (diaclasamento), pela

necessidade de antever a necessidade de rebaixamento do nível freático, para minimizar este fenómeno.

c) Estabilidade de taludes

Tanto os canais como as condutas são condicionados pela estabilidade de taludes, naturais e de escavação. As condutas pelo facto de se encontrarem fixas aos taludes naturais, e os canais por ser necessário efectuar escavações para a sua encastração no terreno, pelo que ambos podem potenciar problemas de instabilidade das encostas, como é o caso de maciços com rochas de estrutura bem marcada (xistosidade, estratificação, etc.) quando estas inclinam no sentido do vale e com um ângulo inferior ao da encosta.

A análise da estabilidade de um talude passa pelo estudo geológico das formações que o constituem, pela caracterização morfológica da zona em apreço, bem como das condições hidrogeológicas, do estudo laboratorial da resistência, da deformabilidade do maciço rochoso que o constitui e do enquadramento sísmico regional.

Após a caracterização geotécnica do maciço onde estão previstas implantar este tipo de estruturas, são definidas medidas de estabilização dos taludes que podem passar pela realização de:

- Banquetas, para diminuição do ângulo total de inclinação do talude, uma vez que estas permitem aumentar a estabilidade e diminuir o volume de escavação;
- Drenagem superficial (valetas);
- Muros de contenção (com drenos) ou gabiões;
- Máscaras drenantes;
- Ancoragens e pregagens;
- Redes de protecção associadas a betão projectado;
- Protecção da face do talude para minimizar o perigo de erosão e meteorização, pelo uso de vegetação, enrocamento, 'rip-rap' ou betão projectado;
- Monitorização do comportamento, através da instalação de inclinómetros, marcas topográficas, etc.

Com base na caracterização geotécnica do terreno são efectuados o zonamento e a classificação do maciço pelos métodos apresentados anteriormente, no ponto 2.1.4 deste capítulo.

2.4 - ESTRUTURAS DE TIPO CAVERNA E POÇO

2.4.1 - Objectivos

A caracterização geotécnica do maciço onde se prevê a implementação de um circuito hidráulico com estruturas subterrâneas do tipo caverna e poço, é iniciada a partir da fase que se tenha uma pré-definição do circuito com o objectivo de determinar, com um grau crescente de detalhe e exactidão, a natureza e o comportamento do local à implementação da obra.

As diferentes fases do projecto e os respectivos objectivos estão definidos no Quadro 2-12.

Quadro 2-12 – Estudos de projecto para cavernas/poços (Oliveira, 1994, adaptado).

Fases	Finalidades
Estudo prévio	Localização do poço/central Seleção do local mais adequado
Anteprojecto e Anteprojecto detalhado	Zonamento geotécnico Classificação e modelação geomecânica Método de escavação Métodos de sustimento Melhoramentos de terreno Programa de observação

Tal como no estudo dos túneis/galerias, e canais/conduatas, também aqui a fase de anteprojecto detalhado é geralmente antecedida por outra de anteprojecto, onde se iniciam os trabalhos preliminares de prospecção e ensaios que posteriormente são complementados e detalhados, no sentido de se obterem os elementos necessários ao dimensionamento das estruturas que permitam efectuar o lançamento da empreitada de obra.

2.4.2 - Especificidades

No estudo de cavernas os aspectos geotécnicos a caracterizar são semelhantes aos usados em casos de túneis/galerias, com a diferença que se trata de uma estrutura subterrânea de dimensões da mesma ordem de grandeza nas três dimensões, pelo que se remete a nível de estudos anteriores à fase de anteprojecto detalhado, para o subcapítulo 2.2.2. Neste caso, uma vez que se trata de uma cavidade com a secção transversal maior

proporcionalmente à outra dimensão, os aspectos de estabilidade mecânica e deformabilidade, assumem maior relevância, bem como os problemas relativos ao estado de tensão. Contudo, ao tratar-se do estudo de uma zona concentrada, é possível atingir um melhor nível de conhecimento geotécnico, sendo frequente o recurso a tomografias geofísicas no estudo geotécnico do tecto destas estruturas.

No estudo dos poços/chaminés, os principais aspectos geotécnicos do maciço a estudar são:

- permeabilidade;
- estado de tensão *in situ*;
- ripabilidade e estabilidade da escavação.

a) Permeabilidade

A permeabilidade do maciço é um parâmetro condicionado pela litologia, estrutura do maciço e acidentes tectónicos, e é com base no seu estudo, através do ensaio de absorção de água do tipo Lugeon (subcapítulo 2.1.3.1), que se estabelece o zonamento hidráulico e definem as técnicas adequadas de tratamento.

b) Estado de tensão

O estado de tensão virgem do maciço rochoso neste tipo de obras, a definir em fase de anteprojecto detalhado, é importante uma vez que podem atingir várias dezenas de metros de profundidade, tornando-se necessário prever o seu comportamento geomecânico, problemas eventuais de fluência, bem como o sustimento adequado.

c) Ripabilidade e estabilidade da escavação

Para a ripabilidade é necessário conhecer a litologia, estrutura do maciço e grau de meteorização do mesmo.

Nestas obras a estabilidade da escavação à medida que se avança em profundidade é importante, e tal só é possível conhecendo o estado de tensão do maciço e a sua permeabilidade, de forma a prever o melhor método de sustimento.

Para poços o método de escavação mais utilizado é o de perfuração ascendente, “raise boring”. Este método de escavação permite a execução de poços com diâmetros até 6,0 m

pela execução de um furo piloto descendente com cerca de 0,30 m de diâmetro, após o qual é acoplada uma coroa diamantada com o diâmetro final pretendido para o poço, que no sentido ascendente permite o alargamento do furo inicialmente executado até ao diâmetro pretendido. Contudo, esta técnica exige que na cota final a atingir pelo poço tenha sido previamente realizada uma galeria que permita efectuar a remoção dos escombros da escavação ascendente.

3 - ESTUDO DE CASO: CIRCUITO HIDRÁULICO DE PADROSELOS

3.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS

Neste capítulo procede-se à descrição da metodologia de estudos geológicos e geotécnicos utilizada no âmbito do anteprojecto para o Aproveitamento Hidroeléctrico de Padroselos, no Alto Tâmega, onde se inclui um circuito hidráulico em subterrâneo. O aproveitamento localiza-se nos distritos de Vila Real e Braga, nos concelhos de Boticas e Ribeira de Pena/Cabeceiras de Basto, tendo como linha de água o Rio Bessa (Figura 3-1).

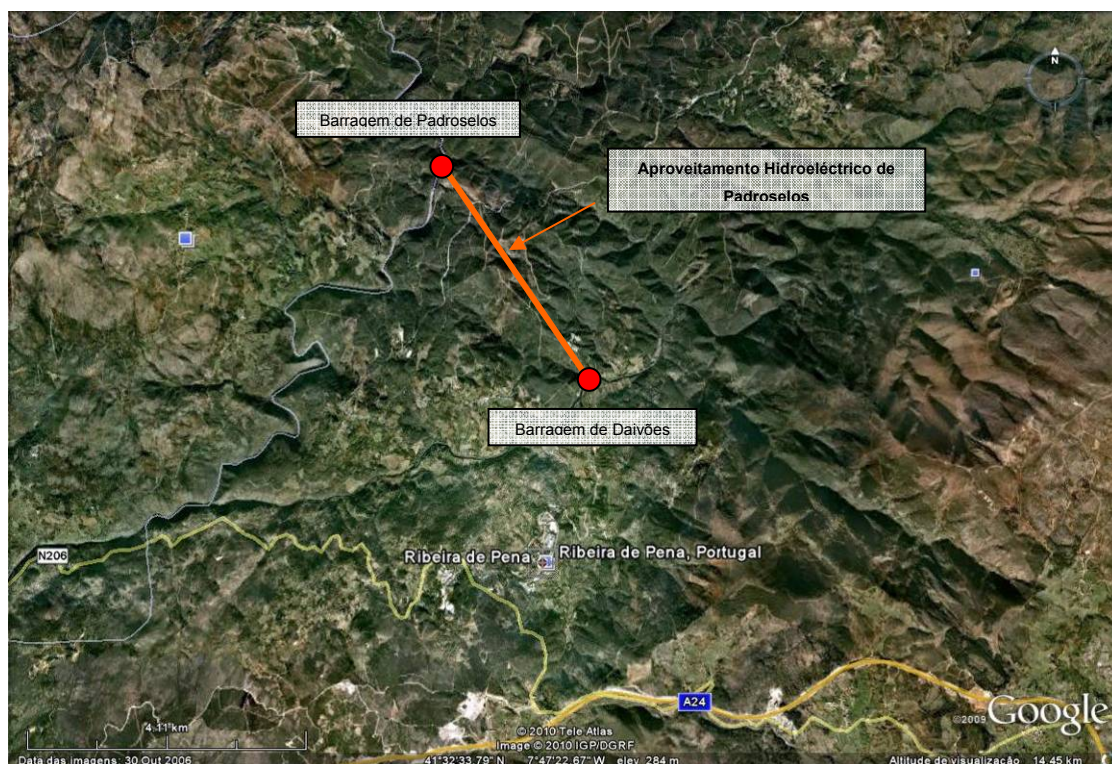


Figura 3-1 – Ortofotomapa com a localização do circuito hidráulico e respectivas barragens
(www.google.pt).

O estudo foi realizado pelo ACE – Agrupamento Complementar de Empresas, Aqualogus – Cenor, para a Iberdrola. Coube à Cenorgeo – Engenharia Geotécnica, Lda., a realização do estudo geológico e geotécnico para o circuito hidráulico, fase de anteprojecto, sendo que foi precedida por uma fase preliminar de estudo de base que lhe serviu para referência e orientação. Estes estudos iniciais decorreram até Abril de 2009, e a fase de anteprojecto até Setembro seguinte. O estudo da barragem de Padroselos foi desenvolvido exclusivamente pela AQUALOGUS, não tendo sido facultado acesso aos elementos do mesmo.

No final da fase de anteprojecto, o Dono de Obra decidiu descontinuar os estudos, tendo inclusive havido trabalhos de prospecção geofísica e mecânica planeados e decididos para a fase de anteprojecto que acabaram por não ser realizados.

O Aproveitamento Hidroeléctrico de Padroselos é constituído por uma barragem de betão arco-gravidade (Figura 3-2, Desenhos A1 e A4 em Anexo) com nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (450,00), e por um circuito hidráulico com uma extensão de 3,8 km, totalmente subterrâneo (recobrimento máximo de 250 m), que incluirá uma central hidroeléctrica reversível, em caverna, restituindo à albufeira de Daivões (Figura 3-1).

Os Quadros 3-1 a 3-3 incluem uma síntese das principais características deste aproveitamento. O circuito é constituído pela tomada de água, poço de comportas, galeria em pressão, chaminé de equilíbrio, câmara de válvulas, conduta forçada, central hidroeléctrica e restituição



Figura 3-2 - Barragem de Padroselos: planta geral (Cenorgeo, 2009c).

Quadro 3-1 – Características gerais da barragem de Padroselos (Cenorgeo, 2009c, adaptado).

Estrutura	Características
CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	Área da bacia hidrográfica dominada pela barragem: 313 km ² Precipitação anual média: 538 mm Escoamento anual médio: 825 mm Caudal modular: 8,2 m ³ /s Caudal de ponta afluente (T=10 000): 1255 m ³ /s
ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA): 450,00 Nível mínimo de exploração (NmE): 420,00 Volume armazenado à cota do NPA: 142 x10 ⁶ m ³ Área inundada à cota do NPA: 491 ha
BARRAGEM	Tipo: arco-gravidade Cota do coroamento: 454,30 Altura da barragem : 109 m Largura do coroamento: 9,30 m Desenvolvimento do coroamento: 355,5 m Cota inferior da superfície geral da fundação: 354 Altura máxima dos encontros (margens esquerda e direita): 47,2 /48,9 m Declive do paramento de montante / jusante: 1:0,1 / 1:0,65 (V:H)

Seguidamente, apresentam-se o enquadramento geomorfológico e geológico geral para o local do circuito, bem como a hidrogeologia, tectónica, neotectónica e sismicidade.

Quadro 3-2 - Características gerais dos órgãos de restituição da barragem de Daivões (Cenorgeo, 2009c, adaptado).

Estrutura	Características
GALERIAS DE RESTITUIÇÃO	Troço entre a central hidroeléctrica e a reunião de túneis: Dois túneis em pressão com 4,40 m de diâmetro interior. Comprimento em planta≈ 60 m Declive da soleira13,8 % Troço entre a reunião de túneis e estrutura de restituição: Túnel em pressão com 6,00 m de diâmetro Comprimento em planta≈ 160 m Declive da soleira13,8 %
ESTRUTURA DE RESTITUIÇÃO	Localização: albufeira de Daivões NMC: 232,00 NPA: 231,00 NmE: 210,00

Quadro 3-3 - Características gerais do circuito hidráulico de Padrocelos (Cenorgeo, 2009c, adaptado).

Estrutura	Características
TOMADA DE ÁGUA	Localização: albufeira de Padrocelos NMC: 453,30 NPA: 450,00 NmE: 420,00 Cota da soleira: 408,00
POÇO DE COMPORTAS	Diâmetro exterior: 8,40 m Diâmetro interior: 7,10m Cota da soleira: 406,68 Altura: 48,3 m Cota da plataforma exterior: 455,00
GALERIA EM PRESSÃO	<u>Troço entre a tomada de água e o poço das comportas:</u> Galeria em pressão com 6,00 m de diâmetro. Comprimento em planta \approx 84 m Declive da soleira : 1,20 % <u>Troço entre o poço das comportas e a chaminé de equilíbrio:</u> Galeria em pressão com 6,00 m de diâmetro. Comprimento em planta \approx 2470 m Declive da soleira: 1,20 % <u>Troço entre a chaminé de equilíbrio e a câmara de válvulas:</u> Galeria em pressão com 6,00 m de diâmetro, com cone de redução excêntrico de 6,00 m para 4,70 m, em aço, na extremidade de jusante. Comprimento em planta \approx 53 m Declive da soleira: 1,06 %
CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	Diâmetro interior: 15,00 m Cota da soleira: 377,00 Cota do topo: 482,00 Altura: 105,00 m
CÂMARA DE VÁLVULAS	Tipo: em caverna Dimensões em planta (interiores): 25,0 m x 17,5 m (comprimento x largura) Altura (no fecho da abóbada): 21,5 m
CONDUTA FORÇADA	<u>Troço entre a câmara de válvulas e a bifurcação:</u> Túnel blindado com aço soldado, com 4,7 m de diâmetro interior. Comprimento em planta \approx 750 m Declive da soleira 27,6 % <u>Troço entre a bifurcação e a central hidroelétrica:</u> Dois túneis blindados com aço soldado, com 3,6 m de diâmetro interior. Comprimento em planta \approx 50 m Declive da soleira 0,0 %
CENTRAL HIDROELÉCTRICA	Tipo: em caverna Tipo de turbinas/bombas Francis de eixo vertical, reversíveis Número de turbinas/bombas: 2 Cota do eixo da turbina/bomba: 177,00 Caudal máximo turbinável (em cada turbina): 60,00 m ³ /s Caudal máximo bombeado (em cada bomba): 45,50 m ³ /s Potência instalada: 230 MW

3.2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO REGIONAL

O local de implantação da barragem de Padroselos e do respectivo circuito hidráulico insere-se, do ponto de vista morfoestrutural, no limite da Zona Centro Ibérica com a subzona Galiza Média Trás-os-Montes da Península Ibérica e desenvolve-se em formações pertencentes ao Maciço Hespérico, o qual constitui a ossatura central da Península (Ribeiro *et al.*, 2000).

Este maciço faz parte da crosta continental rígida, correspondente à cadeia orogénica varisca europeia, constituída essencialmente por formações ante-câmblicas e paleozóicas de natureza fundamentalmente xistosa e granítica e por alguns afloramentos de rochas quartzíticas, mais resistentes e proeminentes no relevo da região. Ocorrem, às vezes, alguns depósitos de cobertura a encobri-las (Ribeiro *et al.*, 2000).

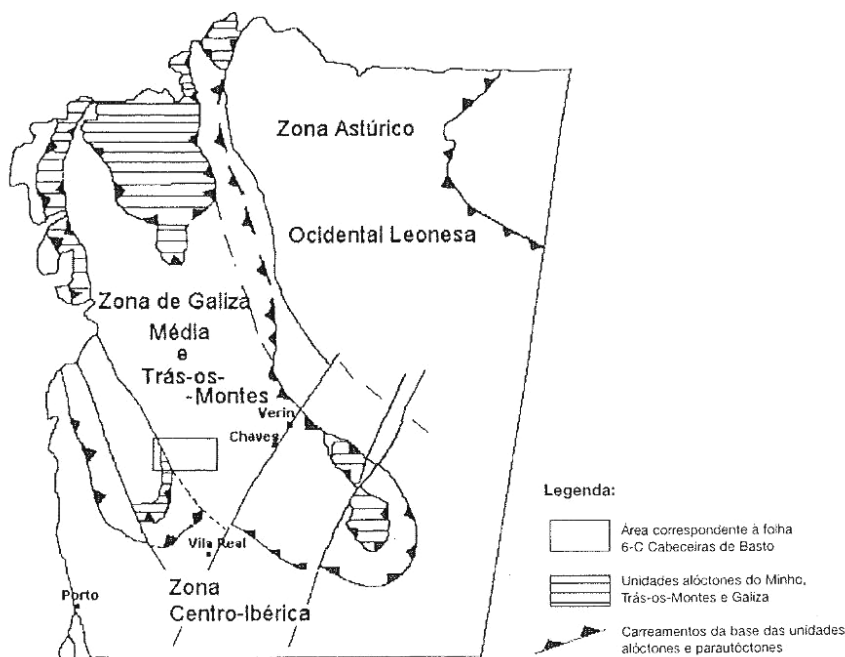


Figura 3-3 - Localização e enquadramento da obra: excerto das unidades geotectónicas do NW Peninsular (segundo Ribeiro *et al.*, 1979; Farias *et al.*, 1987, modificados), sem escala.

No território português a orogenia varisca deixou vestígios desde o Devónico e continuou pelo Paleozóico Superior, durante o qual originou grandes batólitos granitóides. Na parte final da orogenia varisca todo o Maciço Hespérico foi atingido por fracturação intensa, segundo dois sistemas principais de descontinuidades:

- NW-SE a NNW-SSE e NNE-SSW a ENE-WSW, correspondentes a falhas de deslizamento originadas nos primeiros episódios da fracturação tardi-varisca;

- N-S e E-W a WNW-ESSE, correspondentes a direcções de cisalhamentos dúcteis geradas na fase tardia de deformação da orogenia.

Face à composição litológica das formações interessadas (Figura 3-4), de natureza essencialmente xistenta e granitóide, verifica-se que a composição dos terrenos sobre os quais será implantada a barragem de Padroselos, respectiva albufeira, e o circuito hidráulico, correspondem fundamentalmente a dois tipos litológicos principais: xistos e granitos e estruturas filoneanas de componente granitóide (Ribeiro *et al.*, 2000).

Por toda a zona de implantação do circuito hidráulico estão identificadas explorações mineiras, localizando-se o poço da chaminé de equilíbrio deste circuito hidráulico muito próximo de uma antiga área de extracção mineira.



Figura 3-4 – Extracto da carta Geológica de Portugal, escala 1:50.000, Folha 6C-Cabeceiras de Basto (DGGM, 1992), sem escala.

3.3 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO LOCAL

Do ponto de vista geológico (Figura 3-4), a obra interessa unidades constituídas essencialmente por formações de natureza metamórfica e intrusiva, evidenciando elevada heterogeneidade litológica e frequentes variações de fácies. Sobre estes terrenos ocorrem, associados às linhas de água, depósitos recentes do tipo colúvio-aluvionares.

Em termos de formações litológicas e de acordo com a Folha 6-C da Carta Geológica de Portugal (Figura 3-4) na escala 1:50.000 (DGGM, 1992), na área de influência da obra podem identificar-se as seguintes unidades litoestratigráficas:

HOLOCÉNICO

Co+a – Depósitos colúvio-aluvionares, instalados nos vales e encostas dos principais cursos de água, quase sempre de pequena espessura e reduzida extensão. A sua composição é essencialmente arenosa a areno-siltosa, frequentemente com calhaus mal rolados e fragmentos rochosos de dimensão centimétrica a decimétrica. A formação destes depósitos deveu-se à acção conjugada da água e da gravidade, ocorrendo com maior expressão na base das encostas dos vales e preenchimentos dos cursos de água, sendo a sua constituição dependente da natureza xisto-grauvacóide e granitóide.

SILÚRICO SUPERIOR A DEVÓNICO INFERIOR

Sa – Formação de Santos, constituída por xistos negros com abundantes níveis de xistos com intercalações de quartzofilitos e quartzitos e de rochas calcossilicatadas. Esta unidade bordeja o contacto NE com o Complexo granítico de Cabeceiras de Basto, até Santo Aleixo (Ribeira de Pena). Na base da unidade predominam as litologias mais ricas em matéria orgânica e as litologias mais siliciosas, enquanto que no topo predominam as litologias mais pelíticas.

ROCHAS GRANITÓIDES HERCÍNICAS

$\gamma'f1$ – Granitos das Torrinheiras, constituídos por granitos sintectónicos, de duas micas com predomínio de moscovite, de grão fino e fino a médio. São muito semelhantes aos Granitos de Samão ($\gamma'f1$), no entanto, apresentam menor quantidade de biotite e um predomínio de moscovite. Incluem um granito de grão fino a médio, moscovítico, muito claro e fortemente orientado, cuja orientação é conferida, sobretudo, pela moscovite e pelo quartzo.

FILÕES E MASSAS

γap – Filões aplíticos e/ou pegmatíticos, de composição granítica, em geral associados e constituindo filões com direcção dominante NNW-SSE, N-S a NE-SW e E-W a WNW-ESSE. A maioria destes filões estão relacionados com os granitos sintectónicos, de duas micas, e encontram-se deformados.

3.4 - GEOMORFOLOGIA

A evolução geomorfológica dos terrenos interessados está dependente, por um lado, da constituição litológica das formações geológicas ocorrentes e, por outro lado, da actividade tectónico-estrutural e erosiva que, actuando sobre aqueles terrenos, controlam a sua morfologia. Assim, a evolução morfológica do Maciço Hespérico, desde o final da fase orogénica varisca até à actualidade, foi condicionada pelo clima e pela tectónica.

Como resultado dessa evolução, nas zonas de maior estabilidade tectónica o relevo actual traduz-se pela presença de enormes plataformas elevadas, constituindo extensos planaltos, os quais representam uma importante unidade morfológica designada por Meseta Ibérica.

A nascente do local da obra a implantar situa-se a depressão de Chaves, o oeste a Serra da Cabreira, a sul a Serra do Marão e Alvão e a norte a Serra do Barroso.

Assim, a área nascente caracteriza-se por uma zona de relativa suavidade, constituindo uma extensa área ondulada interrompida pontualmente por vales encaixados de algumas linhas de água e por relevos montanhosos.

Relativamente à rede de drenagem, esta área é condicionada pelas características hidrogeológicas destes terrenos, em regra de considerável permeabilidade, sendo atravessada por linhas de água que correm geralmente segundo as direcções N-S ou NNE-SSW, orientação preferencial das diaclases das formações granitóides, que escavaram vales relativamente apertados e profundos com vertentes íngremes e padrão dendrítico.

O entalhamento dos cursos de água deu origem a uma rede de drenagem organizada, do tipo dendrítico, controlada nalguns trechos estruturalmente pela rede de fracturas e pela xistosidade, com alguns depósitos aluvionares, em regra estreitos e de reduzida espessura. Os principais cursos de água que atravessam esta zona aproveitam o caminho preferencial da direcção da xistosidade predominante, NW-SE, com percursos algo sinuosos, por vezes encaixados, com vales mais abertos. Em extensas áreas baixas e regulares, regista-se a presença de depósitos aluvionares extensos e de grande possança.

A barragem de Padroselos será implantada numa secção medianamente encaixada do rio Bessa (Figura 3-5), com orientação aproximada de NE, a cerca de 500 m a montante do açude do aproveitamento mini-hídrico de Bragadas. O vale é aproximadamente simétrico e de inclinação moderada, com ambas as vertentes inclinando cerca de 30°. O maciço

metassedimentar em que deverá ser fundada a barragem, é constituído essencialmente por xistos com orientação muito uniforme, transversalmente ao vale, com inclinação geral entre 80 e 90° para montante.

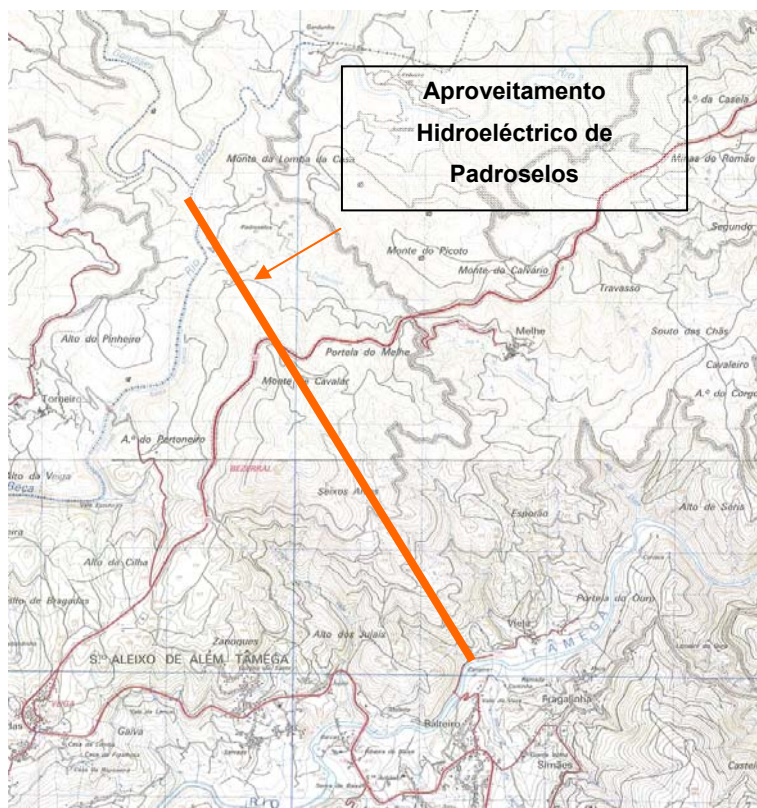


Figura 3-5 - Extracto das Cartas Militares de Portugal, na escala 1: 25.000, Folhas 59 e 73 (IGE, 1997), sem escala.

No que se refere ao circuito hidráulico, entre a tomada de água e a restituição no rio Tâmega (Figura 3-5), este apresenta um alinhamento recto com uma extensão aproximada de 3,8 km. Atravessa essencialmente micaxistos muito siliciosos de maior dureza, com intercalações mais ou menos espessas de xistos pelíticos, mais brandos. Estas alternâncias são mais evidentes a partir do PK1+000 do túnel de adução, onde as rochas mais duras formam cristas, bem salientes no relevo, com a orientação N60°W dos planos de xistosidade/estratificação.

Relativamente à área de implantação do circuito hidráulico, a rede hidrográfica do tipo dendrítica instalou-se ao longo das zonas de fraqueza do maciço, alinhadas segundo duas direcções:

- A direcção N60°W, paralela à estratificação aproveitando as diferenças de dureza entre os micaxistos muito siliciosos e os xistos pelíticos;
- A direcção entre N e NNE, correspondente a acidentes geológicos ou zonas de fractura do maciço.

Ambos os alinhamentos de fraqueza cruzam o eixo do circuito hidráulico com grande obliquidade (30° a 35°). O maciço é, ainda, atravessado por inúmeros filões aplito-pegmatíticos com atitudes muito diferentes. Alguns destes filões foram objecto de trabalhos mineiros de prospecção e de exploração, destacando-se a faixa que atravessa o circuito hidráulico entre o PK2+250 e o PK2+750, onde se situa a chaminé de equilíbrio.

3.5 - TECTÓNICA, NEOTECTÓNICA E SISMICIDADE

3.5.1 - Enquadramento tectónico

Os terrenos interessados pela obra em estudo sofreram a acção da tectónica dúctil, com a formação de dobramentos, geralmente sinclinais, alongados segundo a direcção NW-SE. Segundo Ribeiro *et al.* (1979) quer as formações granitóides, quer as xistosas, são intersectadas por numerosas falhas e filões podendo ser distinguidos dois episódios de fracturação:

- no primeiro a direcção de compressão máxima aproximadamente N-S, originou dois sistemas de desligamentos conjugados, um sistema esquerdo de direcção NNE-SSW a ENE-WSW, e um sistema direito de direcção NNW-SSE e NW-SE;
- no segundo a compressão máxima é de direcção E-W, tendo afectado sobretudo o bordo ocidental do maciço.

As falhas que afectam o soco hercínico sofreram vários episódios de reactivação, podendo eventualmente algumas delas permanecer activas até à actualidade.

Na região ocorrem algumas falhas, as quais apresentam orientações predominantes NNE-SSW a NE-SW. Assim a rede filoneana ocorrente apresenta preferencialmente aquelas direcções.

Na interpretação fotogeológica e no reconhecimento geológico de superfície não foram reconhecidos acidentes tectónicos com importância geotécnica relevante nem zonas de terrenos instáveis, tendo-se verificado que a atitude geral da xistosidade é predominantemente NW-SE e subvertical, pelo que o circuito hidráulico de Padroselos se orienta praticamente paralelo a ela, constituindo os planos de xistosidade factor adicional de instabilidade na abertura das galerias.

Na zona do aproveitamento hidráulico e do ponto de vista da tectónica frágil, identificaram-se dois sistemas:

- o primeiro, o da xistosidade, em que ocorriam recorrentemente juntas de xistosidade estriadas (falhas), que testemunhavam movimento;
- o segundo, constituído por fracturas subverticais, de orientação NE, paralelo ao trecho do rio aproveitado para implantação da barragem, entre as quais, não se identificou ainda qualquer falha.

Embora a intrusão granítica não interfira directamente com o local da obra, regista-se que a respectiva fracturação está sistematizada de modo diferente. Merece realce o facto de a principal orientação de falhamento ser a muito generalizada fracturação hercínica, NNE.

3.5.2 - Neotectónica

Como referido anteriormente a região é recortada por inúmeras falhas de idade hercínica apresentando orientação geral NNE-SSW, das quais se destaca a falha Penacova-Régua-Verim. Esta falha corresponde a um desligamento esquerdo tardivarisco pertencendo ao mesmo sistema de fracturas que o acidente Manteigas-Vilariça-Bragança; sendo-lhe subparalelo localizando-se cerca de 60 km a ocidente. Apresenta um comprimento de aproximadamente 200 km em Portugal, desde uma área a sul de Penacova, até a norte de Chaves, estendendo-se em território espanhol por mais 20 km, até Verim (Cabral, 1995).

Na Figura 3-6 apresenta-se um extracto da carta neotectónica de Portugal Continental com a localização da obra.

Existem inúmeras evidências desta falha ter sido reactivada após a Orogenia Varisca, quer pela importante influência que esta estrutura tem na morfologia do Norte do território português, controlando o desenvolvimento do conjunto de relevos que constituem as montanhas ocidentais, e a evolução do alinhamento de depressões tectónicas Vila-Real-Chaves, que caracterizam a zona de falha neste sector, quer pela sua relação com alguns depósitos de cobertura preservados em áreas deprimidas tectonicamente (Cabral, 1995).

Os testemunhos da sua reactivação revelam-se com deslocamentos verticais importantes, assinalados por escarpas de falha imponentes, como a vertente oriental da serra do Caramulo, com cerca de 800 m de comando máximo, assim como várias depressões tectónicas alinhadas ao longo do seu traçado, a norte do rio Douro, nomeadamente as

bacias de Vila Real, Telões, Pedras Salgadas e Chaves, sugerindo tratar-se de bacias de desligamento associadas a uma componente horizontal de movimentação naquela estrutura (Cabral, 1995).



Figura 3-6 - Extracto da Carta Neotectónica de Portugal Continental com a localização da obra (Cenorgeo, sem data), escala aproximada 1:1.000.000.

Como influência neotectónica para a zona onde se localiza a barragem e o circuito hidráulico em estudo, devido à sua proximidade, será importante evidenciar o trecho entre Peso da Régua e Vila Pouca de Aguiar, assim como a depressão de Chaves.

No troço Peso da Régua - Vila Pouca de Aguiar o acidente tectónico Penacova-Régua-Verim corresponde a uma faixa de deformação muito larga, por vezes quilométrica, composta por diversas zonas de movimento, onde se concentra a deformação. A complexidade do acidente será em parte justificada pelos vários episódios de reactivação a que terá estado sujeito, evidenciando por estrias de orientações muito diversos em espelhos de falha (*op. cit.*, 1995).

Este trecho de falha inclui as depressões de Vila Real e Telões correspondendo a uma estrutura activa, por reactivação de uma zona de cisalhamento tardivarisca em desligamento esquerdo, com uma faixa de deformações de 4 a 5 km de largura onde se identifica uma superfície de deslizamento principal. Nesta ampla zona de deformação individualiza-se a bacia de Telões, interpretada como uma bacia tectónica de tipo 'pull-apart' associada a dois segmentos de superfície de desligamento principal dispostos em 'échelon' com 'salto' esquerdo, e a bacia de Vila Real, de geometria e interpretação mais complexas (*ib.*, 1995).

A depressão de Chaves localiza-se a norte da obra em estudo e, segundo alguns autores, as rochas da periferia da bacia apresentam-se fortemente tectonizadas, fundamentalmente por um sistema de fracturas verticais e subverticais de direcção N-S a NNE-SSW, e outros de direcções predominantes N60W e E-W aproximadamente, sugerindo que a génese da bacia estará, ligada com os acidentes tectónicos citados e enquadrada num conjunto mais vasto de 'horsts' e 'grabens'. No interior da depressão identificam-se os depósitos de Vilar de Nantes constituídos por cascalheiras grosseiras e arenitos feldspáticos, com intercalações argilosas e alguns níveis de material negro carbonoso, constituindo a acumulação mais importante da bacia, e os depósitos da superfície de Sanjurge. Estes sedimentos corresponderão a depósitos de sopé alimentados pelas escarpas de falha que lhe ficam respectivamente a leste (escarpa da serra da Padrela) e a Oeste (Cabral, 1995).

Além das abundantes evidências geomorfológicas da origem tectónica da bacia de Chaves, existem evidências no terreno de acidentes tectónicos que controlam a génese da bacia, pela sua relação directa com escarpas de falhas que a delimitam e por afectarem os depósitos preservados no seu interior, como junto a Vilar de Nantes, onde produziram separações verticais nos sedimentos provavelmente superiores a 70 m (*op. cit.*, 1995).

As características neotectónicas da falha Penacova – Régua - Verim, à partida, não terão qualquer implicação na exequibilidade e viabilidade da obra, no entanto, é importante salientar a importância que apresenta quando se trata de um acidente muito próximo que, por seu turno, tem influência no comportamento geotécnico dos terrenos interessados pela obra em caso de um sismo.

3.5.3 - Sismicidade

O território continental português localiza-se na placa euro-asiática, a Norte da fractura Açores - Gibraltar, que constitui a fronteira entre esta placa e a africana. Portugal pertence à subplaca ibérica, que se encontra separada da parte restante da área continental europeia pela cadeia pirenaica.

O movimento relativo das placas euro-asiática e africana, tem variado ao longo dos tempos geológicos desde que se consumou a abertura do Atlântico, no Cretácico superior. Nos últimos 9 milhões de anos a cinemática destas placas tem-se caracterizado pelo movimento para Norte da placa africana, comprimindo a subplaca ibérica, a qual, por sua vez, se desloca tangencialmente em relação à Europa Central ao longo da faixa pirenaica, exibindo por este motivo uma sismicidade particular.

No Atlântico, entre o estreito de Gibraltar e o Banco de Gorringe, a convergência de placas ao longo da fronteira Açores - Gibraltar processa-se em domínio oceânico, dando origem a subducções litosféricas, intra-oceânicas. É o caso que ocorre a Sul deste Banco e que permite explicar a elevada actividade sísmica desta região.

No continente, o movimento para Norte da placa ibérica, comprimida pela placa africana, bem como o movimento divergente W-E da crosta oceânica com origem na dorsal média Atlântica, provocaram a deformação da crosta terrestre, dando origem ao campo de tensões que caracteriza o seu actual regime tectónico.

Portugal localiza-se, assim, numa posição de transição entre a fronteira de placas África - Ibérica e as regiões interiores continentais mais estáveis do NW da Europa. Encontra-se, por essa razão, mais exposto, quer aos sismos de maior magnitude a uma maior distância focal, com origem no mar, na zona activa interplacas, quer aos sismos de magnitude moderada a pequena distância focal, com origem na zona continental intraplaca, de menor actividade sísmica.

Podem assim considerar-se duas grandes zonas de actividade sísmica que afectam o território continental:

- zona activa interplacas, ao longo da fronteira Açores - Gibraltar, responsável pela actividade sísmica no mar, nomeadamente no Banco de Gorringe, que tem dado origem aos maiores sismos históricos que atingiram o continente (1356, 1531, 1755 e 1969);
- zona activa intraplacas, sede de uma actividade sísmica moderada e difusa, mais afastada da fronteira de placas.

De acordo com os sismos históricos e instrumentais registados, segundo dados compilados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica na carta de isossistas de intensidades máximas que se apresenta na Figura 3-7, o local de implantação da barragem e do circuito hidráulico situa-se numa zona com grau de intensidade macrossísmica máxima de VI de acordo com a escala de Mercalli modificada.

Segundo o Regulamento de Segurança a Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP, 1983) em termos de sismicidade a barragem e o circuito hidráulico situa-se na zona sísmica D, a que corresponde um coeficiente de sismicidade $\alpha = 0,3$, apresentando um risco sísmico baixo (ver Quadro 2.4).

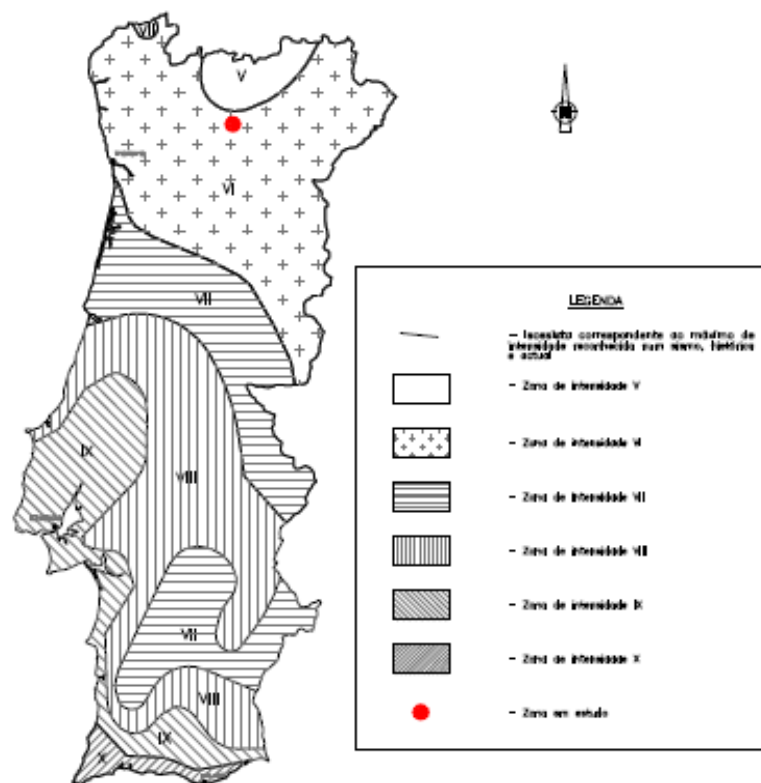


Figura 3-7 - Mapa de intensidades sísmicas com a localização da obra a vermelho, (Cenorgeo, 2009), sem escala.

Este regulamento define ainda os espectros de potência traduzidos por um coeficiente sísmico de referência, β_0 , que apesar de já ter em conta a estrutura a edificar, depende ainda da natureza dos terrenos. Assim, relativamente à natureza destes e tendo em vista as definições de β_0 , apresenta-se no Quadro 3-4 as respectivas tipologias, o qual deve ser considerado apenas como um elemento indicativo.

Com base no estudo elaborado por Oliveira (1977), onde foram produzidas cartas de risco sísmico (Figura 3-8) para o território continental, apresenta-se no Quadro 3-5 o intervalo de valores a considerar para a aceleração, velocidade e deslocamento produzidos por um sismo com um período de retorno de 1000 anos para o local da obra.

Face ao exposto, pode concluir-se que a obra se encontra localizada numa zona de sismicidade baixa.

A título indicativo, para efeitos do zonamento sísmico segundo o Anexo Nacional (Carvalho, 2007) ao EC8 (CEN, 2003) considera-se que a região onde será implantada a barragem e o circuito hidráulico se situa na zona sísmica 1,5 para o cenário de sismo afastado/sismo

interplacas (Acção sísmica tipo 1) e na zona sísmica 2,5 para o cenário de sismo próximo/sismo intraplacas (Acção sísmica tipo 2) - (Figura 3-9).

Quadro 3-4 – Tipologia dos terrenos com vista à definição do coeficiente sísmico de referência, β_0 , para o aproveitamento hidráulico (RSAEEP, 1983).

Formações ocorrentes	Terrenos		
	Tipo I <i>Rochas e solos coerentes rijos</i>	Tipo II <i>Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos</i>	Tipo III <i>Solos coerentes moles e muito moles; solos incoerentes soltos</i>
Solos de alteração dos maciços granitóides e xistosos, assim como das estruturas filoneanas		++	+
Maciços granitóides, maciços xistosos e estruturas filoneanas	++	+	

Nota: + - Possível; ++ - Mais provável.

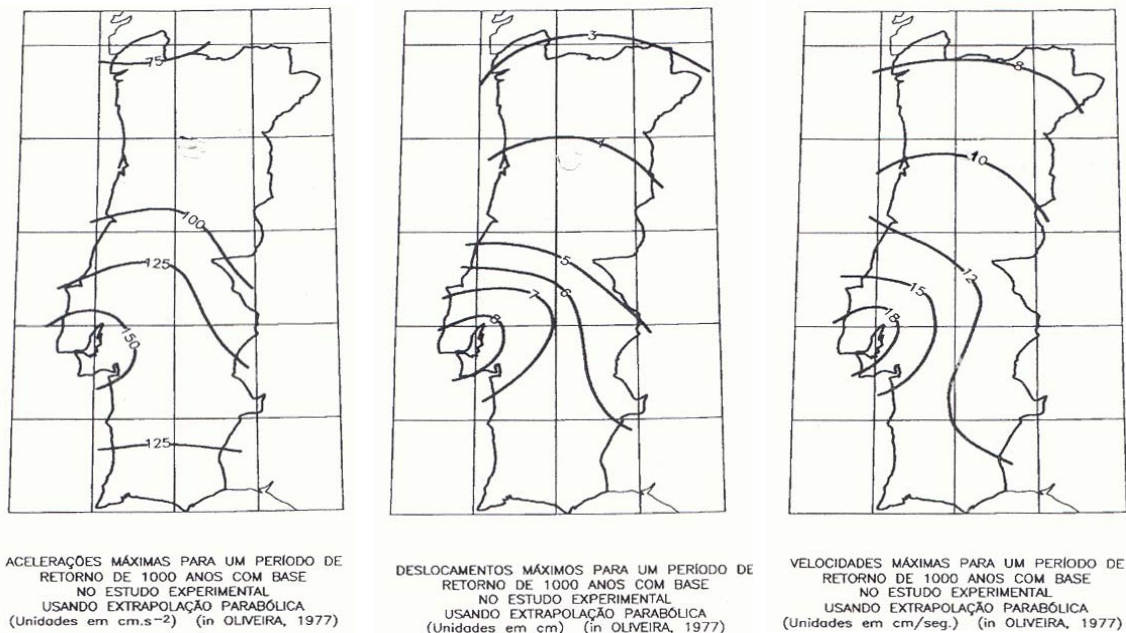


Figura 3-8 - Parâmetros sísmicos para um período de retorno de 1000 anos (Oliveira, 1977, adaptado).

Relativamente à natureza dos terrenos, os granitos e estruturas filoneanas foram considerados terrenos do tipo A, quando superficialmente decompostos em saibros serão

considerados como terrenos do tipo B. As formações xistentas serão também terrenos do tipo A (Quadro 3-6).

Quadro 3-5 – Intervalo de valores para a aceleração, velocidade e deslocamento produzidos por um sismo com um período de retorno de 1000 (Oliveira, 1977).

	Local da obra
Aceleração (cm.s^{-2})	75 - 100
Deslocamento (cm)	3 - 4
Velocidade (cm.s^{-1})	8 - 10

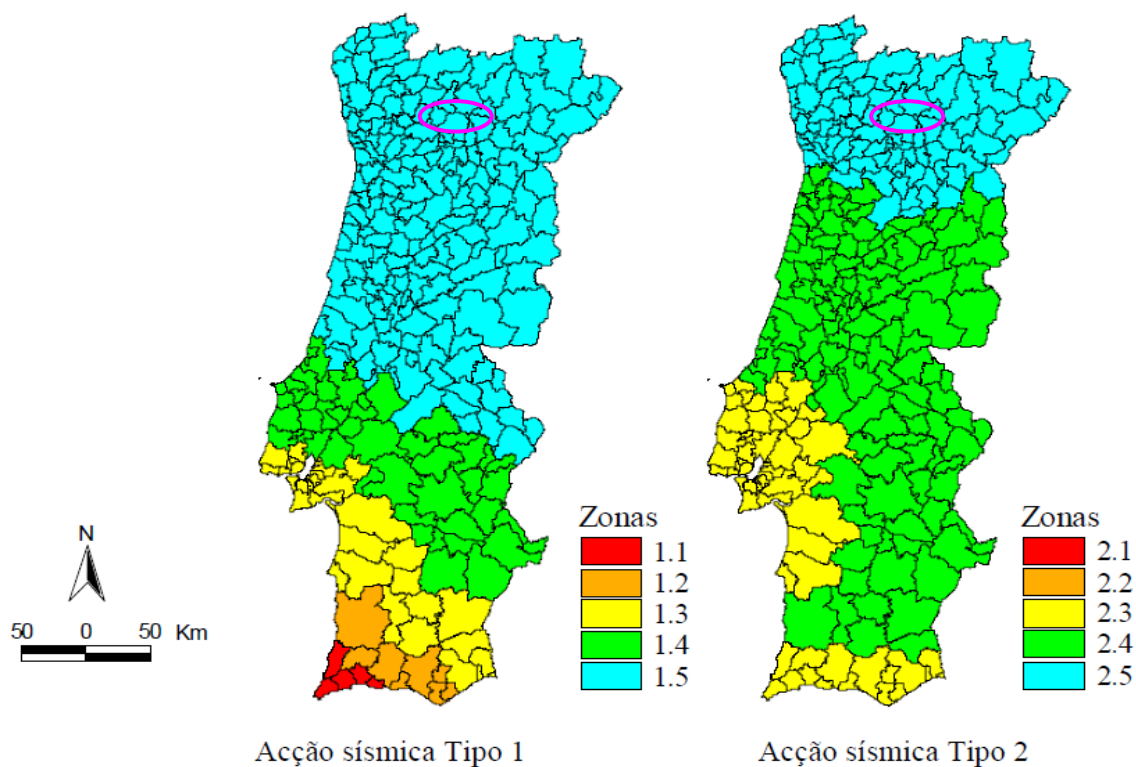


Figura 3-9 - Zonamento sísmico de Portugal Continental (Carvalho, 2007): Acção Sísmica Tipo 1, cenário de sismo afastado/sismo interplacas; Acção Sísmica Tipo 2, cenário de sismo próximo/sismo intraplaca; localização aproximada da obra com um círculo a rosa.

Quadro 3-6 – Tipos de terrenos definidos de acordo com o EC8 (CEN, 2003).

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (pancadas/ 30 cm)	C_u (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material menos resistente à superfície	> 800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de cascalho ou de argila muito rija com, pelo menos, várias dezenas de metros de espessura, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 - 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de cascalho ou de argila rija, com uma espessura desde várias dezenas a muitas centenas de metros	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos, de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	<15	<70
E	Perfil do solo com um estrato aluvionar superficial, com valores de V_s do tipo C ou D e espessura a variar entre cerca de 5 m e 20 m, sobrejacente a um estrato mais rígido com $V_{s,30} > 800$ m/s	-	-	-
S_1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado Índice de Plasticidade ($IP > 40$) e um elevado teor em água	< 100 (indicativo)	-	10 - 20
S_2	Depósitos de solos com potencial de liquefacção, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A - E ou S_1	-	-	-

3.6 - HIDROGEOLOGIA

Na região em estudo afloram, essencialmente, solos residuais resultantes dos maciços decompostos, rochas granitóides, xistentas e estruturas filoneanas aplito-pegmatíticas.

As características hidrogeológicas da região apresentam uma relação directa com as unidades litológicas ocorrentes, sendo condicionadas por diversos factores como a permeabilidade, textura, fracturação, maior ou menor percentagem de material argiloso, etc., dos quais os mais importantes são:

- a litologia;
- a estrutura e tectónica;
- o tipo de solo e coberto vegetal.

Destes factores dependem quer a infiltração e escoamento superficial, quer a circulação subterrânea.

Atendo ao acentuado relevo e declives fortes da região, o escoamento superficial é muito importante e, conseqüentemente, o escoamento subterrâneo é reduzido (Ribeiro *et al.*, 2000).

Os solos residuais apresentam, geralmente, características de permeabilidade passíveis de facilitar a infiltração das águas e a sua posterior percolação no contacto com as formações rochosas subjacentes, menos permeáveis. Em termos gerais, estes terrenos constituem, do ponto de vista hidrogeológico, aquíferos superficiais, podendo também ocorrer níveis de água suspensos, originados pela infiltração das águas superficiais e meteorização em níveis menos permeáveis.

Estes aquíferos, embora de espessura reduzida, tendo em atenção a pequena espessura da maioria destes solos, podem causar alguns condicionalismos ao nível das escavações, particularmente em épocas de maior pluviosidade em que os níveis freáticos se situam próximo da superfície.

No que respeita às formações rochosas (formações graníticas, xistentas e estruturas filoneanas), apresentam diferentes comportamentos à passagem da água consoante o seu grau de alteração e fracturação. A circulação da água dá-se através da rede de fracturas e fissuras existentes e é tanto mais importante quanto maior for a respectiva abertura e menor o espaçamento entre elas. Nos locais em que as fracturas se encontram preenchidas, o fluxo é interrompido. Neste caso, as fracturas passam a constituir barreiras impermeáveis, perdendo o seu carácter de “canais” preferenciais de circulação da água.

As formações xistentas caracterizam-se por um ambiente hidrogeológico heterogéneo e anisotrópico, verificando-se o escoamento através de fissuras, fracturas e falhas, exibindo estas descontinuidades densidades e dimensões muito variáveis, com interligações complexas e imprevisíveis. Os tipos de aquíferos com interesse geotécnico situam-se, assim, próximo da superfície, onde devido à meteorização e à descompressão, é maior a densidade de descontinuidades abertas.

Quanto aos maciços granitóides e estruturas filoneanas, apresentam um comportamento hidrogeológico complexo, em que nas zonas de afloramentos de rocha sã e através de diaclases nos afloramentos de rocha muito alterada, exibem permeabilidade em grande, enquanto que nas zonas de rocha decomposta (saibros) exibem permeabilidade em pequeno, podendo em condições topográficas favoráveis instalarem-se níveis aquíferos. Em regra, estes aquíferos são superficiais, uma vez que as diaclases tendem a fechar em

profundidade, funcionando o maciço rochoso como muro dos aquíferos superficiais, normalmente explorados na região através de poços.

Junto ao traçado observam-se, frequentemente, nascentes de água ao longo de alinhamentos de fraqueza, revelando que o túnel atravessará aquíferos com cotas piezométricas elevadas, instalados nas zonas mais fracturadas do maciço.

4 - CARACTERIZAÇÃO E ZONAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR DO CIRCUITO

Neste capítulo apresenta-se a cartografia geológica de superfície para o local da obra em estudo, bem como os trabalhos de prospecção e ensaios realizados com vista ao zonamento geotécnico preliminar do maciço rochoso afectado pela implantação do circuito hidráulico.

4.1 - CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE

A cartografia geológica de superfície realizada na fase preliminar que serviu de apoio ao anteprojecto, teve por base os seguintes elementos:

- Levantamento topográfico da zona de implantação da barragem, na escala 1: 500;
- Fotografias aéreas, Fiada 4 (8397 e 8398), escala 1: 16.500, de 2008;
- Ortofotomapas, com curvas de nível equidistantes de 2,5 m;
- Cartas Militares de Portugal, na escala 1: 25.000, Folha 59 e 73 (IGE, 1997);
- Carta Geológica de Portugal, na escala 1:500.000 (DGGM, 1992);
- Carta Geológica de Portugal, na escala 1:200.000, Folha 2 (IGM, 2000);
- Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50.000, Folha 6C – Cabeceiras de Basto, (DGGM, 1992) e respectiva notícia explicativa;

A caracterização geológica de superfície foi efectuada com base em levantamentos detalhados dos afloramentos situados ao longo do traçado do circuito hidráulico e tendo em conta as informações de base da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 6-C – Cabeceiras de Basto (DGGM, 1992), e respectiva notícia explicativa (Ribeiro *et al.*, 2000). Nesse levantamento geológico identificaram-se os tipos litológicos principais das formações metassedimentares do Silúrico, bem como os filões e outros aspectos considerados com interesse para a caracterização geotécnica do maciço (Desenhos A2 e A3 em Anexo). Procedeu-se, ainda, ao estudo da compartimentação (falhas e outros alinhamentos estruturais, xistosidade e diaclases).

No que se refere aos tipos litológicos, foram cartografadas as principais cristas geomorfológicas constituídas, predominantemente, por micaxistos muito ricos em veios de quartzo de exsudação (identificados pelo símbolo Mi, no Desenho A3 em Anexo), distinguindo-as das restantes formações em que predominam alternâncias de micaxistos e xistos pelíticos (identificados pelo símbolo Mi/X, no Desenho A3 em Anexo).

O estudo da compartimentação do maciço, (fracturação e xistosidade), consistiu na medição de atitudes em cerca de 23 locais ao longo de todo o circuito, que se pretendeu serem representativos de cada zona em estudo, com uma média geral de um local de medição por cada 100 - 200 m de circuito. O número de leituras em cada local foi variável (entre 10 e 34), em função da dimensão/exposição dos afloramentos disponíveis.

Os dados obtidos foram tratados com o programa de representação estereográfica *Dips* – versão 5.1, da *Rocscience*®, tendo em vista a identificação de atitudes preferenciais (famílias) de ocorrência da fracturação e da xistosidade. Foi feita uma análise mais geral, a nível de todo o circuito, e outra particular, para cada uma das estruturas localizadas já referidas em 3.1. Nos Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo que incluem planta e perfil geotécnico à escala 1:4 000, contempla-se a representação gráfica do resultado daquela análise para cada zona considerada, que consiste na representação dos pólos dos diversos planos numa rede estereográfica do tipo polar, hemisfério inferior.

Em alguns destes locais foi ainda efectuada uma caracterização geotécnica mais detalhada do maciço por observação directa dos afloramentos, com aplicação da classificação de Bieniawski (1989) e os respectivos parâmetros estimados por inspecção visual (grau de fracturação, RQD e as condições das superfícies das discontinuidades) e métodos expeditos (martelo de *Schmidt*) de avaliação da resistência à compressão uniaxial da rocha. Estes locais foram designados por estações geomecânicas e estão assinalados nos Desenhos A3 a A6, em Anexo. Definiram-se 16 estações com afastamentos variáveis, entre cerca de 200 e 300 m.

Com a nova informação obtida no desenrolar da prospecção geotécnica foram sucessivamente completados/rectificados os limites geológicos definidos em planta e perfil, respectivamente.

4.2 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO E ENSAIOS GEOTÉCNICOS

4.2.1 - Características gerais

Numa fase de estudo preliminar que serviu de apoio ao anteprojecto em curso, estavam previstos e foram realizados alguns trabalhos de prospecção geofísica, que se referem no Quadro 4-1.

Quadro 4-1 – Trabalhos de prospecção geofísica realizados na fase de estudo preliminar
(Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Prospecção geofísica	Quantidades	Objectivo
Sísmica de refacção	8	Profundidade do firme rochoso. Determinação da velocidade das ondas P e S. Configuração e continuidade dos horizontes sísmicos. Ripabilidade.
Perfis de resistividade eléctrica	5	Identificação de anomalias ou contrastes de resistividades do maciço rochoso de modo a contribuir, essencialmente, para a sua caracterização estrutural e hidrogeológica.

Os perfis sísmicos (Quadro 4-1) foram executados com recurso a 3 tiros: directo, inverso e central; e executados perpendicularmente às curvas de nível, tendo as profundidades investigadas variado entre 24 e 30 m. Foi utilizado um sismógrafo modelo RAS – 24, de elevada resolução, e 24 geofones, equidistantes de 2,5 m.

Os 8 perfis sísmicos de refacção, foram designados de PSCIP (Perfil Sísmico do Circuito Hidráulico de Padroselos), seguidos do respectivo número de identificação.

Cada um dos perfis de resistividade eléctrica (Quadro 4-1) foi realizado recorrendo ao método da tomografia eléctrica, segundo alinhamentos rectos de comprimentos que variaram entre 330 e 1080 m, com arranjo dipolo-dipolo. Foram designados de PRCIP (Perfil de Resistividade eléctrica do Circuito Hidráulico de Padroselos) seguidos do respectivo número de identificação (Desenho A3 em Anexo).

Além dos trabalhos de prospecção geofísica, executaram-se trabalhos de prospecção mecânica preliminares, envolvendo a realização de 4 sondagens mecânicas (Quadro 4-2) à rotação com recuperação contínua de testemunhos, designadas de SCIP - Sondagem do Circuito Hidráulico de Padroselos. Estas sondagens à rotação carotadas permitiram aceder directamente, em profundidade, ao local de execução das estruturas, possibilitando a recuperação contínua de material proveniente da furação, sobre o qual se efectuou a respectiva descrição (ISRM, 1981) do maciço em profundidade, em função de parâmetros descritos adiante, no subcapítulo 4.2.4, referente às sondagens mecânicas.

A sondagem SCIP1 interessou uma falha entre 60,0 e 70,0 m de comprimento de furação. A execução da sondagem SCIP2 apresentou várias dificuldades, tendo sido necessário efectuar 3 furos:

- o primeiro, designado por SCIP2, foi realizado à rotação até 100,6 m de profundidade, tendo sido abandonado por se ter verificado o encravamento da ferramenta e a perda da coluna de furação;
- o segundo, designado por SCIP2A, atingiu 40,0 m de profundidade e foi abandonado por destruição e perda da coroa de furação devido, segundo informação do sondador, à existência de quartzo solto;
- o terceiro, designado por SCIP2B, foi realizado até aos 80,0 m de profundidade com furação à rotopercussão com martelo de fundo de furo e prosseguindo à rotação até 120,0 m recorrendo ao método “*wire line*”, com diâmetro NQ necessário para garantir a execução de ensaios dilatométricos.

Na sondagem SCIP2 e até aos 70 m, aproximadamente, o material encontrado era muito friável, tendo-se utilizado lamas bentoníticas para estabilizar o furo. Admitiu-se que a sondagem tivesse atravessado uma cavidade mineira entre 30,0 e 70,0 m de comprimento de furação.

Na furação da SCIP3 também foram encontradas inúmeras dificuldades: até 75,0 m de comprimento de furação, atravessaram-se terrenos de muito má qualidade devido à presença de uma caixa de falha nesta zona.

Quadro 4-2 – Características das sondagens preliminares executadas (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Sondagem	Localização	Cota (m)	Diâmetro final de furação (mm)	Comprimento de furação (m)	Atitude		Nível de água (m)	Amostragem para ensaios laboratoriais	Nº ensaios Lugeon
SCIP1	Poço de comportas da tomada de água	454,52	NQ (75 mm)	80	60°	N145°	-	5	15
SCIP2	Chaminé de equilíbrio	484,51	HQ (96 mm)	100,6	90°	-	-	7	18
SCIP2A	Chaminé de equilíbrio	484,58	-	40	90°	-	-	-	-
SCIP2B	Chaminé de equilíbrio	484,47	NQ (75 mm)	120	90°	-	27	-	-
SCIP3	Central subterrânea	323,83	HQ (96 mm)	180,3	70°	N145°	39,8	13	21
SCIP4	Restituição	235,36	NQ (75 mm)	60,35	60°	N170°	16,3	3	10

Todos os trabalhos de prospecção definidos para o estudo de anteprojecto encontram-se presentes no Desenho A3, em Anexo.

Foram previstos ainda para esta fase de estudo ensaios *in situ* e em laboratório, que consistiram na realização de:

a) Ensaios de campo, dentro de furos:

- 64 ensaios Lugeon, para caracterização do maciço do ponto de vista hidráulico (fracturação, percolação e injectabilidade) - (Quadro 4-1);
- 6 ensaios dilatométricos, para caracterização da deformabilidade do maciço rochoso, 4 dos quais na SCIP3, sendo que os restantes foram realizados na SCIP2. Ficaram por realizar, devido à dificuldade em manter os furos acessíveis ao dilatómetro, os ensaios previstos para a sondagem SCIP4, junto à obra de restituição.

b) Ensaios de laboratório em amostras obtidas de tarolos das sondagens:

- 2 ensaios de identificação física e mecânica de amostras, um em provete da SCIP3 e o outro da SCIP2;
- 110 provetes para compressão pontual (PLT), com o objectivo de estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_{ci}), 73 dos quais na SCIP3 e os restantes na SCIP2;
- 9 provetes para resistência à compressão uniaxial: 2 provetes na SCIP1, 3 provetes na SCIP2, 3 provetes na SCIP3 e 1 provete na SCIP4;
- 9 provetes para ultrassónicos: 2 provetes na SCIP1, 3 provetes na SCIP2, 3 provetes na SCIP3 e 1 provete na SCIP4;
- 3 provetes de perfurabilidade e abrasividade pelo método Schimazek: um provete na SCIP1, um provete na SCIP2 e um provete na SCIP3;
- 6 provetes de abrasividade e dureza Cerchar: um provete na SCIP1, um provete na SCIP2, 3 provetes na SCIP3 e um provete na SCIP4.

Apresenta-se, em seguida, uma síntese dos trabalhos efectuados e resultados obtidos no estudo acompanhado.

4.2.2 - Sísmica de refacção

Os perfis sísmicos de refacção foram realizados no início da fase de estudo, tendo como objectivo medir a velocidade de propagação das ondas sísmicas para interpretar as características geotécnicas dos maciços de fundação, assim como a avaliação da ripabilidade, de forma a definir o método de escavação mais adequado.

No Quadro 4-3 indicam-se as características respectivas, e as profundidades a partir das quais aparece o horizonte do maciço mais compacto, com velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais $V_p > 2000$ m/s. Os resultados obtidos concordam com o estado de meteorização do maciço que se observa à superfície e demais informação recolhida, nomeadamente nas sondagens realizadas posteriormente.

Quadro 4-3 – Profundidades do horizonte com velocidades $V_p > 2000$ m/s (Cenorgeo, 2009a).

Perfis sísmicos	Linha de base (m)	Localização	Profundidade do horizonte $V_p > 2000$ m/s
PSCIP2	120	Tomada de água	2 a 8 m
PSCIP3	120	Chaminé de equilíbrio	3 a 7 m
PSCIP4	120	Saída do túnel de adução	10 a 19 m
PSCIP1	96	A montante da Central	6 a 11 m
PSCIP5	120		
PSCIP6	120	Central	9 a 14 m
PSCIP7	120	A jusante da Central	11 a 25 m
PSCIP8	120		

4.2.3 - Perfis de resistividades eléctricas

A prospecção geoelectrica realizada teve como principal objectivo a identificação de anomalias ou contrastes de resistividades no maciço rochoso, assim como contribuir para a sua caracterização estrutural e hidrogeológica. De um modo geral, os resultados obtidos desta prospecção facilitaram a programação das sondagens mecânicas e, por essa razão, foram realizados logo na fase inicial de estudo, com a excepção do PRCIP5, que apenas foi realizado já na segunda parte.

Os perfis de resistividade eléctrica (Quadro 4-4) foram também realizados pela SEG, em Fevereiro de 2009 e, no caso do PRCIP5, Maio de 2009.

Quadro 4-4 – Localização dos perfis de resistividade e respectivo comprimento (Cenorgeo, 2009a).

Perfis de resistividade eléctrica	Localização	Comprimento (m)
PRCIP1	Túnel de adução	3800
PRCIP2	Central hidroeléctrica	410
PRCIP3		330
PRCIP4		410
PRCIP5	Entre a chaminé de equilíbrio e a restituição	1080

O perfil PRCIP1 revelou resistividades baixas entre os PK 1+200 e PK 2+570 ($< 250 \Omega.m$), onde se suspeita da presença de um ou vários acidentes geológicos, aproximadamente subparalelos ao eixo do túnel. Fora deste troço central foram ainda identificadas algumas zonas isoladas de resistividades baixas ($< 250 \Omega.m$) que são atribuídas a eventuais filões e/ou falhas transversais ao túnel (Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo).

Nos perfis PRCIP2, PRCIP3 e PRCIP4, identificaram-se algumas zonas de contraste e/ou de resistividades baixas que se admitem corresponder a acidentes geológicos e/ou maciço mais meteorizado até maior profundidade.

No perfil PRCIP5 identificaram-se algumas anomalias com resistividades muito baixas, algumas delas relacionadas com acidentes geológicos identificados anteriormente e confirmados pelas sondagens (caso da sondagem SCIP3) - Desenho A6 em Anexo. Outras anomalias foram atribuídas à presença do circuito mini-hídrico de Bragadas (chaminé de equilíbrio, túnel e conduta forçada).

4.2.4 - Sondagens mecânicas

Como referido, executaram-se 4 sondagens mecânicas (Quadro 4-2) à rotação com recuperação contínua de testemunhos (SCIP1, SCIP2, SCIP3 e SCIP4). Estas sondagens decorreram entre os meses de Março e Abril de 2009, estiveram a cargo da SEG (SCIP1 e SCIP2), e da RODIO, Geotecnia e Engenharia de Fundações (SCIP3 e SCIP4).

As sondagens previstas e realizadas encontram-se na planta geológica geral à escala 1:10.000 (Desenho A3 em Anexo).

O material proveniente de furação foi classificado em função de (ISRM, 1981):

- Descrição litológica (das diferentes formações geológicas atravessadas);
- Estado de meteorização do maciço (Quadro 4-5);
- Espaçamento das descontinuidades (Quadro 4-6);
- Características das descontinuidades (comprimento, abertura, rugosidade, enchimento, alteração);
- Índice de recuperação modificado (RQD);
- Resistência à rotura em compressão (RCU).

Quadro 4-5 – Estados de meteorização (ISRM, 1981).

Símbolo		Designações	Características
W1	W1-2	Sã	Sem quaisquer sinais de alteração
W2		Pouco alterada	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W3	W3	Medianamente alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W4	W4-5	Muito alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso e a rocha é parcialmente friável
W5		Decompоста	O maciço apresenta-se completamente friável, com comportamento de solo

Quadro 4-6 – Grau de fracturação (ISRM, 1981).

Intervalo (cm)	Símbolo		Designações	
>200	F ₁	F ₁₋₂	Muito afastadas	Afastadas
60 a 200	F ₂		Afastadas	
20 a 60	F ₃	F ₃	Medianamente afastadas	Medianamente afastadas
6 a 20	F ₄	F ₄₋₅	Próximas	Próximas
<6	F ₅		Muito próximas	

4.2.5 - Ensaios Lugeon

a) Considerações gerais

Na fase de estudo preliminar foram realizados 64 ensaios tipo Lugeon, por trechos de 5 m, com 3 ou 5 patamares de pressão, para caracterizar o maciço do ponto de vista hidráulico (fracturação, percolação e injectabilidade) em 4 sondagens (SCIP1 a SCIP4) -Quadro 4-7.

Quadro 4-7 – Número de ensaios tipo Lugeon realizados em cada sondagens (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	Nº total de ensaios
SCIP1	15
SCIP2	18
SCIP3	21
SCIP4	10
Total	64

Antes de iniciar a execução de cada ensaio, garantiu-se a ausência de quaisquer detritos provenientes da furação e/ou da superfície, no furo de sondagem, para não se falsearem os resultados. De igual modo, garantiu-se a ausência de quaisquer partículas em suspensão, na água a utilizar, estando a mesma clara e límpida.

O ensaio realizou-se de modo descendente, recorrendo a um obturador simples insuflado no topo do trecho a ensaiar, sendo a base do mesmo o maciço rochoso. Utilizaram-se dois manómetros, devidamente calibrados, para o controlo da pressão de injeção de água à superfície (M1) e a medição da pressão total na câmara de ensaio (M2). Efectuou-se a contabilização (em contador) do volume de água necessário para a manutenção de cada patamar de pressão (3 ou 5 patamares), estabilizado durante 10 minutos, sendo as leituras executadas minuto a minuto.

Para interpretação dos resultados dos ensaios Lugeon sugeriram-se os critérios gerais descritos no Quadro 4-8.

Quadro 4-8 - Interpretação dos resultados dos ensaios tipo Lugeon (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

1. Regime de Escoamento	<p><u>Laminar</u>: no gráfico os pontos ($P < A$) alinham-se aproximadamente segundo uma recta, admitindo-se pequenas oscilações;</p> <p><u>Turbulento</u>: quando as absorções crescem proporcionalmente menos que as pressões (curva convexa para baixo);</p> <p><u>Anormal</u> (também designado por misto ou irregular): todo o escoamento que não seja tipicamente laminar ou turbulento.</p>
2. Comportamento das fracturas	<p><u>Escoamento laminar</u> – abertura elástica das fracturas;</p> <p><u>Escoamentos de regime anormal</u>, os comportamentos do maciço e das descontinuidades foram caracterizados do seguinte modo:</p> <p><u>Fracturação hidráulica</u>, por aumento brusco e acentuado das absorções a partir de um determinado patamar de pressão, não havendo coincidência mesmo a baixas pressões do ramo descendente com o ramo ascendente;</p> <p><u>Dilatação reversível ou irreversível</u>, quando as absorções crescem proporcionalmente mais que as pressões (curva convexa para cima);</p> <p><u>Mobilização do material de enchimento das descontinuidades</u> (desobstrução ou obstrução dos caminhos de escoamentos).</p>
3. Avaliação da permeabilidade	<p><u>Escoamento laminar</u> - valor médio das Lu de cada patamar de pressão;</p> <p><u>Escoamento turbulento</u> - poderá indicar-se como inferior ao valor em Lu do primeiro patamar de pressão (p. ex. < 20 Lu);</p> <p><u>Escoamento anormal</u> - valor obtém-se pela interpretação do gráfico tendo em conta as características originais do maciço, isto é, antes de haver modificações provocadas pela injeção de água em pressão, como por exemplo fracturação hidráulica, mobilização do material de preenchimento das descontinuidades, etc.</p>

Na interpretação dos resultados utilizou-se a seguinte simbologia:

- PT: Perda total;
- L: Regime laminar;
- T: Regime turbulento;
- A: Regime anormal;
- Fr: Fracturação hidráulica;
- Di: Dilatação das fracturas;
- De: Desobstrução das fracturas;
- O: Obstrução das fracturas.

b) Resultados obtidos

Sondagem SCIP1 – Nesta sondagem realizaram-se 15 ensaios Lugeon, a partir de 5,0 m de comprimento de furação até ao final do furo (80,0 m). Os resultados obtidos encontram-se resumidos no Quadro 4-9.

Estes ensaios mostram que o maciço é muito permeável até cerca de 35,0 m de profundidade devido à presença de fracturas abertas a muito abertas. Verificou-se sempre perda total de água, não se atingindo a pressão correspondente ao primeiro patamar de ensaio.

Quadro 4-9 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP1 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Trecho de ensaio (m)		Pressão manométrica efectiva (bar) / Volume (l)										Interpretação	
Início	Fim	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	Lu	Características
5,00	10,00	1,0	-	3,0	-	1,0	-		-		-	PT	-
10,00	15,00	1,0	-	3,0	-	1,0	-		-		-	PT	-
15,00	20,00	1,0	-	3,0	-	1,0	-		-		-	PT	-
20,00	25,00	1,0	-	4,0	-	8,0	-	4,0	-	1,0	-	PT	-
25,00	30,00	1,0	-	4,0	-	8,0	-	4,0	-	1,0	-	PT	-
30,00	35,00	1,0	-	4,0	-	8,0	-	4,0		1,0	-	PT	-
35,00	40,00	1,0	2,0	4,0	6,6	8,0	11,0	4,0	2,5	1,0	1,3	<1	-
40,00	45,00	1,0	1,0	4,0	2,0	8,0	9,0	4,0	1,0	1,0	0,0	<1	-
45,00	49,00	1,0	0,2	4,0	5,0	8,0	6,7	4,0	2,8	1,0	0,1	<1	-
49,00	55,00	1,0	0,2	4,0	3,0	8,0	3,8	4,0	2,0	1,0	0,1	<1	-
55,00	60,00	1,0	3,7	4,0	10,6	8,0	17,8	4,0	15,5	1,0	4,6	<1	-
60,00	65,00	1,0	210,0	2,9	394,0	1,0	300,0		-		-	25	A - De
65,00	70,00	1,0	116,0	3,0	313,0	3,4	416,0		-		-	16	A - Di
70,00	75,00	1,0	3,7	4,0	7,1	8,0	31,0	4,0	10,6	1,0	0,8	<1	-
75,00	80,00	1,0	0,2	4,0	13,3	8,0	25,0	4,0	15,0	1,0	0,0	<1	-

Abaixo dos 35,0 m o maciço pode considerar-se 'impermeável' (<1 Lu) com excepção dos ensaios efectuados na zona de influência de uma falha, atravessada entre os 60,0 e 70,0 m de profundidade, onde se obtiveram valores de 16 e 25 Lu com tendência para a desobstrução das fracturas e dilatação.

Sondagem SCIP2 – Esta sondagem, situada a eixo da chaminé de equilíbrio, incluiu 18 ensaios entre 10 e 100 m de comprimento de furação. Por dificuldades encontradas durante a furação, não se efectuaram ensaios abaixo daquele comprimento. Os resultados registados encontram-se resumidos no Quadro 4-10.

Estes ensaios revelaram um maciço pouco permeável havendo a assinalar que depois dos 75 m de comprimento de furação, o nível de água passou a estabilizar por volta de 47,0 a 50,0 m. No entanto, a partir das informações do sondador, num dos furos complementares houve uma queda brusca do equipamento por volta dos 30 m o que deve corresponder ao atravessamento de uma cavidade mineira.

Quadro 4-10 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP2 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Trecho de ensaio (m)		Pressão manométrica efectiva (bar) / Volume (l)										Interpretação	
Início	Fim	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	Lu	Características
10,00	15,00	1,0	4	3,0	6	1,0	2		-		-	<1	-
15,00	20,00	1,0	11	3,0	21	1,0	13		-		-	1	L
20,00	25,00	1,0	12	3,0	20	1,0	12		-		-	<1	-
25,00	30,00	1,0	56	3,0	134	1,0	88		-		-	<5	A
30,00	35,00	1,0	0	3,0	0	1,0	0		-		-	0	-
35,00	40,00	1,0	0	3,0	0	1,0	0		-		-	0	-
40,00	45,00	1,0	0	4,0	3	8,0	14	4,0	2	1,0	0	<1	-
45,00	50,00	1,0	0	4,0	5	8,0	21	4,0	6	1,0	0	<1	-
50,00	55,00	1,0	0	4,0	20	8,0	46	4,0	29	1,0	1	1	A
55,00	60,00	1,0	0	4,0	4	8,0	28	4,0	4	1,0	0	<1	-
60,00	65,00	1,0	0	4,0	6	8,0	13	4,0	4	1,0	0	<1	-
65,00	70,00	1,0	0	4,0	32	8,0	130	4,0	53	1,0	1	<3	A-Di
70,00	75,00	1,0	0	4,0	43	8,0	241	4,0	66	1,0	0	3	A-Di
75,00	80,00	1,0	2	4,0	28	8,0	233	4,0	54	1,0	0	<5	A-Di
80,00	85,00	1,0	23	4,0	158	8,0	252	4,0	156	1,0	30	4	A
85,00	90,00	1,0	34	4,0	141	8,0	276	4,0	148	1,0	31	4	A
90,00	95,00	1,0	18	4,0	148	8,0	285	4,0	179	1,0	29	<5	A
95,00	100,00	1,0	7	4,0	35	6,0	59	4,0	39	1,0	8	5	A

Sondagem SCIP3 – Nesta sondagem os ensaios foram sistematicamente efectuados a partir de 75 m de comprimento de furação, depois do atravessamento do terreno de muito má

qualidade, atribuído a uma caixa de falha. Os resultados registados dos ensaios estão resumidos no Quadro 4-11.

Nos ensaios efectuados a partir dos 85,0 m de comprimento de furação, numa zona do maciço afastada daquela falha, obtiveram-se permeabilidades baixas. Contudo, no trecho final do furo, ao comprimento de furação entre 155,0 e 180,0 m, os ensaios revelaram uma permeabilidade moderada.

Quadro 4-11 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP3 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Trecho de ensaio (m)		Pressão manométrica efectiva (bar) / Volume (l)										Interpretação	
Início	Fim	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	Lu	Características
80,00	85,00	1,0	121,6	4,0	299,5	8,0	432,9	4,0	291,7	1,0	149,2	9	L
85,00	90,00	1,0	8,5	4,0	2,6	8,0	3,3	4,0	1,1	1,0	0,2	<1	-
90,00	95,00	1,0	2,7	4,0	4,9	8,0	8,6	4,0	2,4	1,0	0	<1	-
95,00	100,00	1,0	0	4,0	0	8,0	0,17	4,0	0	1,0	0	0	-
100,00	105,00	1,0	0	4,0	0,2	8,0	0,07	4,0	0	1,0	0	0	-
105,00	110,00	1,0	0	4,0	2,5	8,0	2,2	4,0	0	1,0	0	0	-
110,00	115,00	1,0	0	4,0	0,9	8,0	2,9	4,0	0	1,0	0	0	-
115,00	120,00	1,0	0,6	4,0	0,6	8,0	1,1	4,0	0	1,0	0	0	-
120,00	125,00	1,0	2	4,0	6	8,0	8,9	4,0	0,8	1,0	0	<1	-
125,00	130,00	1,0	0	4,0	0	8,0	2,2	4,0	0,1	1,0	0	0	-
130,00	135,00	1,0	2,4	4,0	9	8,0	17,5	4,0	6,2	1,0	1,3	<1	-
135,00	140,00	1,0	4,1	4,0	11,4	8,0	22,2	4,0	1,6	1,0	1,7	<1	-
140,00	145,00	1,0	5	4,0	24,8	8,0	92,3	4,0	24	1,0	7,7	<2	L-Di
145,00	150,00	1,0	0,3	4,0	2	8,0	6	4,0	0	1,0	0	0	-
150,00	155,00	1,0	9,4	4,0	13,2	8,0	23,1	4,0	14,4	1,0	6,3	<1	-
155,00	160,00	1,0	192	4,0	310	8,0	380	4,0	300	1,0	216	7	T
160,00	165,00	1,0	241	4,0	345	8,0	426	4,0	357	1,0	248	7	T
165,00	170,00	1,0	88	4,0	209	8,0	352	4,0	203	1,0	92	6	A
170,00	175,00	1,0	0	4,0	100	8,0	250	4,0	50	1,0	0	4	A-Di
175,00	180,00	1,0	38	4,0	156	8,0	320	4,0	116	1,0	28	5	A-Di

Sondagem SCIP4 – Contemplou 10 ensaios tipo Lugeon, a partir de 10 m de comprimento de furação, sendo os três primeiros ensaios com 3 patamares de pressão e os restantes com 5 patamares. Os resultados obtidos encontram-se resumidos no Quadro 4-12.

De um modo geral as permeabilidades do maciço são moderadas a elevadas até ao fundo da sondagem havendo a assinalar um comportamento distinto do maciço acima e abaixo dos 35 m.

Acima dos 35 m o escoamento é anormal com tendência para deformação reversível do maciço, enquanto que abaixo daquela profundidade o escoamento é turbulento atribuído à presença de algumas fracturas abertas.

Quadro 4-12 – Resultados dos ensaios tipo Lugeon da SCIP4 (Cenorgeo, 2009a, adaptado).

Trecho de ensaio (m)		Pressão manométrica efectiva (bar) / Volume (l)										Interpretação	
Início	Fim	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	Lu	Características
15,00	20,00	1,0	138	3,0	347	1,0	125	-	-	-	-	15	A-Di
20,00	25,00	1,0	112	3,0	290	1,0	94	-	-	-	-	<12	A-Di
25,00	30,00	1,0	3	4,0	178	8,0	305	4	223	1	56	<6	A-Di
30,00	35,00	1,0	0	4,0	128	8,0	280	4	115	1	48	6	A-Di
35,00	40,00	1,0	256	4,0	472	8,0	650	4	484	1	281	13	T
40,00	45,00	1,0	300	4,0	510	8,0	681	4,0	507	1,0	320	14	T
45,00	50,00	1,0	262	4,0	490	8,0	669	4,0	500	1,0	310	14	T
50,00	55,00	1,0	300	4,0	366	8,0	550	4,0	400	1,0	244	12	T
55,00	60,00	1,0	330	4,0	527	8,0	680	4,0	520	1,0	278	14	T

4.2.6 - Ensaios dilatométricos

Para a caracterização da deformabilidade do maciço, na fase de estudo preliminar foram programados ensaios dilatométricos, com o dilatómetro de 75 mm de diâmetro do LNEC, nas sondagens SCIP2 e SCIP3 e SCIP4 situadas junto às principais estruturas subterrâneas do circuito hidráulico: chaminé de equilíbrio, central subterrânea, e restituição, respectivamente.

À data de realização desta dissertação, dispunha-se apenas dos ensaios efectuados nas sondagens SCIP2 e SCIP3. Por dificuldades em manter os furos acessíveis ao dilatómetro não foi possível efectuar, em tempo útil, os ensaios na sondagem SCIP4, junto à estrutura de restituição.

Por limitação do equipamento, os ensaios foram programados até uma profundidade máxima de 120 m, em locais previamente escolhidos com base na observação dos testemunhos das sondagens. Para cada ensaio definiram-se 3 ciclos de carga e descarga, respectivamente às pressões máximas de $P_1=3,0\text{MPa}$, $P_2=6,0\text{MPa}$ e $P_3=9,0\text{MPa}$. A pressão inicial de encosto foi de $P_0=0,5\text{MPa}$. As deformações correspondentes foram medidas segundo 4 direcções. Os módulos dilatométricos médios que se apresentam no Quadro 4-13 foram calculados pelo LNEC, com a média aritmética dos deslocamentos obtidos na 1ª descarga e na 2ª carga.

Quadro 4-13 – Módulos dilatométricos médios em cada ciclo de carga (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	Comprimento de furação (m)	Módulos dilatométricos médios (GPa)		
		P ₁ =3,0 MPa	P ₂ =6,0 MPa	P ₃ =9,0 MPa
SCIP3	93,7	5,6	6,5	–
	106,5	7,2	8,4	8,6
	115	9,9	7,7	7,1
	117,9	*	9,6	10,4
SCIP2	109,8	–	–	–
	110,2	9,4	–	–

* Deformações anómalas na direcção B durante a descarga do 1º ciclo de 3 MPa.
P₁, P₂ e P₃ representam as pressões máximas para cada ciclo de carga e descarga.

Verifica-se que os valores dos módulos dilatométricos na sondagem SCIP3 variam aproximadamente entre 6 e 10 GPa, sendo que na sondagem SCIP2 se obteve o módulo dilatométrico de 9,4 GPa.

4.2.7 - Ensaios laboratoriais

Nas sondagens SCIP1, SCIP2, SCIP3 e SCIP4 foram seleccionadas 15 provetes de rochas metassedimentares (micaxistos) para os seguintes ensaios:

- identificação física e mecânica de amostras: massas volúmicas real e aparente e porosidade;
- ensaios mecânicos e ultrassónicos: resistência à compressão pontual e uniaxial (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson) e velocidades de propagação de ondas;
- previsão de comportamento: determinação do índice DRI e dos índices Schimazek, CAI e DU dos ensaios Cerchar.

a) Identificação física

Em duas amostras colhidas das sondagens SCIP2 e SCIP3, procedeu-se à determinação da massa volúmica, real e aparente, e da porosidade, segundo a norma NP EN1936 (2008), e realizada pela SEG.

Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados no Quadro 4-14.

Quadro 4-14 – Resultados das massas volúmicas e porosidade num par de amostras de micaxistos (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	Amostragem ao comprimento de furação (m)	Massas volúmicas (kN/m ³)		Porosidade %
		real	aparente	
SCIP3	129,10 / 129,70	28,05	27,66	1,36
SCIP2	84,50 / 85,00	28,63	28,25	1,6

b) Mecânicos e dinâmicos

Foi realizada uma campanha de ensaios PLT sobre provetes de melhor qualidade obtidos nas sondagens SCIP2 e SCIP3, com o objectivo de estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha (σ_c), parâmetro necessário para estimar as características geomecânicas do maciço rochoso. Os provetes, ensaiados de acordo com a norma ASTM D5731 pelo LNEC, em Setembro de 2009, foram agrupados em 4 grupos de amostras de quartzofilitos. No Quadro 4-15 indica-se, para cada amostra, o comprimento de furação a que foram retirados e o número de ensaios de carga, diametral e axial.

No Quadro 4-16 apresentam-se os índices de resistência médios $I_{S(50)}$, axiais e diametrais, para cada conjunto de amostras de quartzofilitos ensaiados. De salientar que, tratando-se de rochas metassedimentares, a carga diametral foi aplicada no plano da xistosidade, e a carga axial aplicada no plano perpendicular a esta. Cada grupo de amostras abrangeu o ensaio de cerca de 21 a 37 provetes.

Quadro 4-15 – Características das amostras de quartzofilitos submetidas a ensaios de PLT (Cenorgeo, 2009a).

Amostra Nº	Sondagem Nº	Amostragem ao comprimento de furação (m)	Nº de ensaios (un)		
			Total	Diametrais (válidos)	Axiais (válidos)
16	SCIP 3	128,30	21	10	11
17	SCIP 3	136,40	24	12	11
18	SCIP 3	179,25	28	13	15
19	SCIP 2	83,95 - 92,90	37	18	19

Quadro 4-16 – Índices de resistência à compressão médios obtidos nos ensaios de PLT (Cenorgeo, 2009a).

Amostra N°	Referência laboratório	$I_{S(50)}$ - valores médios dos ensaios (MPa)		I_a - Índice de anisotropia *
		Diametrais	Axiais	
16	222	2,14	4,54	2,12
17	224	1,57	3,50	2,24
18	226	2,50	6,36	2,54
19	228	2,67	5,31	1,99

* o índice de anisotropia avalia a relação entre o valor de $I_{S(50)}$ determinado perpendicular (axial) e paralelamente (diametral) à xistosidade.

Os índices obtidos nas rochas ensaiadas, quartzofílicas, de acordo com a classificação de Bieniawski (1989) enquadram-se na classe de resistência $4 < I_{S(50)} < 10$ MPa, correspondente a rochas muito resistentes; situando-se a correspondente a resistência à compressão uniaxial da rocha, σ_c , entre 100 e 250 MPa. De referir, ainda, que o índice de anisotropia, I_a , variou entre 1,99 e 2,54, evidenciando de sobremaneira a influência da estrutura no valor da resistência à compressão pontual.

Efectuaram-se ainda, sobre micaxistos, ensaios de compressão uniaxial e determinação da velocidade das ondas ultrassónicas em provetes de rochas provenientes das sondagens SCIP1, SCIP2, SCIP3 e SCIP4. Estes desenrolaram-se no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), no decorrer do mês de Junho de 2009. Estes ensaios tiveram por finalidade determinar, por um lado, a resistência à compressão uniaxial da rocha (RCU), o respectivo módulo de deformabilidade (E) e coeficiente de Poisson (ν); e por outro as velocidades de propagação das ondas acústicas longitudinais (V_p) e transversais (V_t).

Os provetes foram ensaiados numa prensa MTS, *Rocktool*® de grande rigidez e apropriada para materiais rochosos e betão. As velocidades adoptadas foram sendo ajustadas de forma a que a rotura ocorresse entre 2 e 15 minutos após o início do carregamento.

Os resultados obtidos incluem o Quadro 4-17. Assinala-se que os valores correspondentes aos coeficientes de Poisson são anormalmente elevados para o tipo de litologia analisado. De facto, para os micaxistos ensaiados seria de esperar valores de ordem de 50% dos registados.

Quadro 4-17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e ultrassônicos em micaxistos (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	Amostragem ao comprimento de furação (m)	Compressão uniaxial			Ensaio de ultrassons (m/s)	
		RCU (MPa)	E GPa	ν	V_p	V_T
SCIP1	40,05/40,45	24,20	4,0		7948	3188
	42,80/43,20	24,30	5,5		5311	2946
SCIP2	70,40/70,90	3,6	1,4		3245	1955
	84,50/85,60	14,2	4,5		5868	2946
	92,00/92,40	23,1	4,1		5384	3192
SCIP3	109,10/109,50	56,37	24,96	0,38	3488	(1)
	118,40/119,10	24,67	4,02	0,45	1357	(1)
	129,10/129,70	36,42	13,47	0,49	27,66	(1)
SCIP4	42,70/43,20	14,98	2,95	0,33	1461	(1)

(1) não foram efectuadas determinações das velocidades de propagação transversais (V_T) nas amostras colhidas nas sondagens SCIP3 e SCIP4.

Os valores de RCU nos micaxistos variam entre 3,6 e 56,4 MPa. Apesar dos micaxistos serem rochas bastante duras, as resistências relativamente baixas obtidas resultam dos provetes ensaiados apresentarem superfícies de fraqueza acentuada e anisotropia dada pela foliação resultante das alternâncias de leitos milimétricos de minerais micáceos e quartzo e pela interface entre os micaxistos e as massas de quartzo de exsudação. De assinalar, ainda, que parte das superfícies da fraqueza contém óxidos de ferro (limonite), acentuando ainda mais a resistência baixa naqueles planos. Assim, a dispersão destes resultados decorre do efeito de variação da orientação daquelas estruturas da rocha face ao eixo de aplicação do carregamento, como geralmente acontece neste tipo de litologias, devendo os valores mais baixos corresponder aos menores ângulos entre aquelas e a direcção de aplicação da força da prensa. Aliás, verificou-se comportamento idêntico nos ensaios de compressão pontual, como acima se salientou.

Face aos resultados obtidos e aos conhecimentos geotécnicos relativos a este tipo de litologias, o estudo geotécnico preconizou que, para micaxistos e face a uma orientação mais favorável da estrutura (subperpendicular à direcção de aplicação do carregamento), aquele valor deveria ser superior a 40 MPa, quando pouco alterados a sãos; enquanto que em micaxistos medianamente alterados, o valor da resistência da rocha descenderia para cerca de 20 MPa (Cenorgeo, 2009c).

c) Previsão de comportamento

Os ensaios de previsão de comportamento foram encomendados à RODIO (2009) e executados no laboratório CEPASA, *Ensayos Geotécnicos S.A*, com recurso à norma UNE-22950-3, em Setembro de 2009, em Madrid. Foram efectuados os seguintes ensaios (ver Quadro 2-4):

- Ensaaios para avaliação da perfurabilidade da rocha (determinação do índice DRI) e estudo petrográfico para avaliação do índice de Schimazek (abrasividade), em 3 amostras;
- Ensaaios de abrasividade Cerchar com determinação dos índices CAI e de dureza (DU), em 6 amostras.

De realçar que estes ensaios foram programados nas formações mais abrasivas, principalmente em micaxistos muito ricos em quartzo (quartzofilitos), de forma proporcional ao que se prevê encontrar nas escavações subterrâneas. Os respectivos resultados encontram-se no Quadro 4-18.

Relativamente aos resultados obtidos e de acordo com as tabelas apresentadas no subcapítulo 2.1.3.2 para as classes de abrasividade e dureza Cerchar, podem tecer-se as conclusões incluídas nos Quadros 4-19 e 4-20. Isto é, a maioria das rochas é dura (66,7% das amostras) e as amostras ensaiadas revelaram-se ora abrasivas a muito abrasivas (50%) ora pouco a muito pouco abrasivas (50%), o que pode ser justificado pela variabilidade em minerais abrasivos das amostras de micaxistos seleccionadas para estes ensaios.

Quadro 4-18 – Resultados dos ensaios de perfurabilidade e de abrasividade em micaxistos ricos em quartzo (Cenorgeo, 2009a).

Sond N°	Amostra (m) *	CERCHAR							SCHIMAZEK				PERFURABILIDADE		
		DUREZA				ABRASIVIDADE			EQz	Φ	σ_t	F_{Schim}	Indice de fragmen.	Indice de perfur.	DRI
		Min.	Int.	Máx.	DU médio	Inf.	Sup.	CAI médio	(%)	(cm)	(MPa)	(kN/m)			
SCIP1	47,40-49,00	34,2	34,8	94,2	54,4	0,1	0,1	0,1	39,66	0,0332	4,34	0,571	59,40	17,95	64
SCIP2	98,30-100,20	108,0	113,4	126,0	115,8	0,6	0,8	0,7	39,66	0,0964	5,49	2,099	51,99	16,28	54
SCIP3	93,95-94,50	53,4	75,0	89,4	72,6	1,4	1,4	1,4							
SCIP3	147,85-149,80	53,4	75,0	85,8	71,4	2,6	2,8	2,7	54,14	0,0774	9,5	3,979	41,09	24,43	47
SCIP3	150,30-150,90	28,2	49,2	55,8	44,4	1,2	1,4	1,3							
SCIP4	51,55-52,17	24,6	26,4	40,2	30,4	0,7	0,7	0,7							

*Amostragem no trecho de comprimento de furação indicado.

Quadro 4-19 – Classificação da abrasividade para os ensaios realizados (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	CAI	Abrasividade
SCIP1	0,1	Rocha muito pouco abrasiva
SCIP2	0,7	Rocha pouco abrasiva
SCIP3	1,4	Rocha abrasiva
SCIP3	2,7	Rocha muito abrasiva
SCIP3	1,3	Rocha abrasiva
SCIP4	0,7	Rocha pouco abrasiva

Quadro 4-20 – Classificação da dureza para os ensaios realizados (Cenorgeo, 2009a).

Sondagem Nº	DU	Dureza
SCIP1	54,4	Rocha dura
SCIP2	115,8	Rocha muito dura
SCIP3	72,6	Rocha dura
SCIP3	71,4	Rocha dura
SCIP3	44,4	Rocha dura
SCIP4	30,4	Rocha medianamente dura

Os valores obtidos em 3 amostras para o índice de perfurabilidade, DRI, compreendidos entre 47 e 64, revelam tratar-se de rochas que se integram nas categorias de dureza média a alta, de acordo com Bruland (1998). Contudo, saliente-se o reduzido número de ensaios efectuado.

4.3 - ZONAMENTO GEOTÉCNICO

Apresentam-se, seguidamente, as condições geotécnicas do maciço a afectar pelo circuito hidráulico, tendo por base uma breve análise dos resultados obtidos durante esta fase de estudos, começando pela descrição dos elementos que estiveram na base da definição das diferentes zonas.

4.3.1 - Informação de base

A caracterização geotécnica do maciço onde serão instaladas as obras do circuito hidráulico foi efectuada com base nos seguintes elementos:

- cartografia geológica publicada às escalas 1:200.000 e 1:50.000;
- interpretação da fotografia aérea;
- levantamentos geológicos de superfície;
- resultados da prospecção geofísica (perfis de resistividade eléctrica e de refração sísmica);
- resultados das sondagens de furação;
- ensaios “in situ”;
- ensaios laboratoriais.

De salientar que a prospecção mecânica, que forneceu a informação directa sobre o maciço rochoso, consistiu apenas em 4 sondagens, situadas junto às principais estruturas (poço de comportas da tomada de água, chaminé de equilíbrio, central subterrânea e túnel de restituição), apresentadas no Desenho A3 e, em pormenor, nos Desenhos A6 a A9, todos eles em Anexo. A Cenorgeo (2009c) extrapolou os resultados das sondagens para todo o maciço onde se desenvolvem aquelas estruturas, essencialmente com base na prospecção geoelectrica, na interpretação da fotografia aérea e nos levantamentos geológicos de superfície. O resultado correspondente encontra-se nos Desenhos A4 a A10, em Anexo.

Na caracterização geotécnica do maciço consideraram-se ainda algumas informações entretanto obtidas relativas a ocorrências geológicas e tipo de dificuldades encontradas durante a abertura do túnel da mini-hídrica de Bragadas, na área envolvente a este estudo.

4.3.2 - Caracterização geotécnica

a) Sondagens

Como já foi referido, foram efectuadas 4 sondagens mecânicas à rotação (SCIP1 a SCIP4). Para além dos levantamentos geológicos das sondagens efectuadas pelas empresas sondadoras, e que são apresentados em gráficos individuais (“logs”), o ACE efectuou um levantamento sistemático das amostras dirigido para a classificação geomecânica do maciço de Bieniawski (1989), que interessa directamente às estruturas subterrâneas.

Neste levantamento, o procedimento que se seguiu foi o seguinte:

- a) divisão das sondagens por trechos, aproximadamente homogéneos (zonamento da sondagem);
- b) para cada trecho procedeu-se, à sua caracterização geotécnica tendo por base os seguintes parâmetros:
 - estado de meteorização do maciço (W);

- grau de fracturação do maciço (F);
 - resistência à compressão uniaxial da rocha (RCU);
 - RQD;
 - espaçamento das descontinuidades;
 - características das descontinuidades (comprimento (m), abertura (mm), rugosidade, enchimento e alteração).
- c) com base na classificação de Bieniawski (1989), procedeu-se à atribuição de pesos às características de cada trecho, referentes ao índice de carga pontual, à resistência à compressão uniaxial da rocha (RCU), RQD, espaçamento das descontinuidades, e características das mesmas (comprimento (m), abertura (mm), rugosidade, enchimento e alteração). Do somatório dos pesos para cada trecho obteve-se o RMR, e deste derivou-se o índice GSI (Hoek, 2006) admitindo, como recomendado, o maciço seco ($P_w=15$) e o ajustamento da orientação de fracturação muito favorável ($P_{aj}=0$):

$$\mathbf{GSI = RMR_{89} + 10} \quad \text{(equação 4.1)}$$

Na representação gráfica das sondagens nos perfis geotécnicos, considerou-se o zonamento com base no índice GSI em substituição dos índice de recuperação modificados (RQD) correntemente utilizados, pelo facto de este ser pouco fiável em rochas xistentas (Deere, 1989). De salientar, que os valores de RQD constam dos “logs” das sondagens, apresentados pelas empresas sondadoras.

Desta forma o zonamento geotécnico do maciço (Quadro 4-21) onde se inserem as obras do circuito hidráulico foi efectuado com base nos valores GSI, obtidos nas sondagens, considerando 3 zonas:

- a) **10 < GSI < 30** – maciço de qualidade fraca;
- b) **30 < GSI < 50** – maciço de qualidade medíocre a razoável;
- c) **50 < GSI < 70** – maciço de qualidade razoável a boa.

De assinalar, que valores de $GSI > 70$ não foram encontrados, de modo significativo, nas sondagens executadas. Indicam-se no Quadro 4-22 os comprimentos acumulados de cada uma das zonas detectadas nas 4 sondagens efectuadas.

Quadro 4-21 – Zonamento preliminar do maciço (Cenorgeo, 2009c, adaptado).

Zonas geotécnicas		Grau de meteorização	Grau de fracturação	REC (%)	RMR	GSI	Desmonte
ZG3 *		W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 60	< 20	< 30	meios mecânicos
ZG2	ZG2 B	W _{3,4} com passagens W ₄₋₅	F _{3,4} com passagens F ₄₋₅	> 50	20-40	30-50	meios mecânicos potentes
	ZG2 A	W _{2,3} com passagens W _{3,4}	F _{2,3} com passagens F _{3,4}	100	40-60	50-70	explosivos e/ou meios mecânicos potentes
ZG1		W ₁₋₂	F ₁₋₂ com passagens F _{3,2} e F _{3,4}	100	> 60	> 70	explosivos

*Inclui zonas de falhas.

Quadro 4-22 – Percentagens das classes consideradas para o GSI e definidas nas sondagens (Cenorgeo, 2009b).

Sondagem Nº	10 < GSI < 30	30 < GSI < 50	50 < GSI < 70	Comprimento acumulado (m)
SCIP1	3,0 m	14,65 m	62,35 m	80
SCIP2	23,6 m	53,25 m	43,15 m	120
SCIP3	46,75 m	53,8 m	79,75 m	180,3
SCIP4	14,0 m	29,90 m	16,45 m	60,35
Totais (m)	87,35 m	151,6 m	201,7 m	440,65
Percentagem	19,80%	34,40%	45,80%	100%

Na sondagem SCIP1 predomina o maciço com a classe de melhor qualidade, tendo a de pior qualidade pouca representação (4%). Contrariamente, nas sondagens SCIP2, SCIP3 e SCIP4 a classe de pior qualidade (10 < GSI < 30) está representada em cerca de 20 a 25% e as restantes classes têm uma ocorrência sensivelmente idêntica.

Com base nas zonas geotécnicas definidas, nas condições hidrogeológicas esperadas para o maciço (P_w) e na orientação da compartimentação em relação ao eixo principal da obra subterrânea (P_{or}), definiu-se o valor de RMR para estimar o sustimento (Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo) da seguinte forma:

$$RMR_{(89)} = GSI - 10 + P_w + P_{or} \quad (\text{equação 4.2})$$

Para as condições hidrogeológicas (P_w) do maciço foram consideradas três situações:

- i. Maciço húmido a saturado (1 – 2,5 l/min.m) com zonas de escorrência localizadas em acidentes geológicos e filões (>25 l/min.m), relacionado com resistividades baixas (< 500 Ω .m);
- ii. Maciço seco a saturado (0 – 2,5 l/min.m) com zonas de escorrência localizadas em acidentes geológicos e filões (<25 l/min), relacionado com resistividades mais elevadas (> 500 Ω .m);
- iii. Zonas isoladas do maciço correspondentes ao atravessamento de alguns acidentes geológicos em que os caudais das afluições podem ser superiores a 25 l/min.

Para cada uma das situações, atribuiu-se um peso definido de acordo com Bieniawski (1989). Procedeu-se de igual modo para a orientação das descontinuidades em relação ao eixo do túnel (P_{or}). Com base no valor de RMR assim determinado, definiram-se as classes de qualidade do maciço, representadas no Quadro 4-23.

Quadro 4-23 – Valores de RMR em função das classes de qualidade do maciço
(Cenorgeo, 2009b).

Classes de qualidade	RMR
CR1	> 60
CR2	40 - 60
CR3	20 - 40
CR4	< 20
CR5	Zonas de falhas

b) Condições hidrogeológicas

Os 64 ensaios tipo Lugeon efectuados nas sondagens mostram que as formações metassedimentares são, em geral, muito pouco permeáveis, podendo ser permeáveis próximo da superfície onde a morfologia do terreno é propícia à descompressão do maciço. À superfície, observaram-se algumas nascentes de água, dispersas, que parecem estar relacionadas geralmente com acidentes geológicos e corpos filoneanos.

Partindo destes dados de base, admitiu-se que a percolação de água se daria, essencialmente, através da rede de fracturação, preferencialmente ao longo dos acidentes geológicos e das fracturas abertas interessando, no entanto, as zonas mais superficiais do maciço rochoso. Em profundidade, a ocorrência de água nas obras subterrâneas será mais provável ao longo de alguns dos acidentes geológicos identificados, nomeadamente falhas, filões quartzosos e aplito-pegmatíticos, caracterizados por intensa fracturação.

c) Compartimentação do maciço

O maciço é atravessado por diversos alinhamentos geoestruturais identificados na fotografia aérea, estando alguns assinalados na folha 6-C da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000 (DGM, 1992) como falhas.

Pela observação da fotografia aérea (1:16.500 de 2008) e da cartografia geológica disponíveis, pela observação de campo e pelos dados de prospecção geoelectrica foi possível concluir que existem diversos alinhamentos estruturais/fraqueza ao longo do circuito. Estes alinhamentos apresentam duas direcções preferenciais:

- Direcção N60°W, sensivelmente paralela à xistosidade e que resulta essencialmente das diferenças de dureza entre os micaxistos muito siliciosos e os xistos pelíticos;
- Direcção entre N-S e NNE-SSW, correspondente a acidentes geológicos ou zonas de fractura do maciço.

Relativamente aos sistemas de fracturação do maciço refere-se que, tomando todos os levantamentos efectuados ao longo do circuito hidráulico (desenhos A3 a A6 em Anexo), se nota uma grande dispersão dos pólos. Contudo, verifica-se a existência de duas famílias principais de fracturas, uma com atitude $020^\circ \pm 30^\circ$; $80^\circ \pm 10^\circ$ e a outra $135^\circ \pm 25^\circ$, $70^\circ \pm 20^\circ$ e $55^\circ \pm 15^\circ$. Verifica-se, ainda, a existência de diaclases com outras direcções, aleatórias, e com inclinação igual ou inferior a 30° . Os sistemas de fracturação serão descritos para cada estrutura caracterizada nos subcapítulos seguintes.

As superfícies dos principais planos de descontinuidade do maciço foram caracterizados, em termos médios, do ponto de vista das respectivas características físicas e geométricas, conforme se indica no Quadro 4-24.

Quadro 4-24 – Características dos principais planos de descontinuidades (Cenorgeo, 2009b).

Características	Diaclases	Xistosidade
Espaçamento	6 - 60 cm	<6 mm
Persistência	3 – 10 m	> 3 m
Separação	Fechadas a 5 mm	Fechadas
Rugosidade	Onduladas, lisas a rugosas	Ligeiramente onduladas, lisas a pouco rugosas
Enchimento	Duro, às vezes mole	Não tem
Alteração	Não alteradas a moderadamente alteradas	Não alteradas
Resistência das paredes	Média a elevada	Baixa a média, devido aos minerais micáceos

Com base naqueles valores, estimaram-se os parâmetros resistentes do maciço rochoso, aplicando a classificação de Bieniawski (1989, tabela 4E), o que permitiu estimar os valores que constam do Quadro 4-25. Preconizou-se uma coesão para o maciço entre 5 (xistosidade) e 10 MPa (diaclases), enquanto o respectivo ângulo de atrito rondará 27° a 30°, respectivamente (Cenorgeo, 2009b).

Quadro 4-25 – Parâmetros de resistência ao corte do maciço rochoso (Cenorgeo, 2009b).

Família considerada	c_m (MPa)	ϕ_m (°)
Diaclases	10	30
Xistosidade	5	27

Estes parâmetros deverão ser comparados, posteriormente, com os resultados dos ensaios previstos de deslizamento de diaclases, programados para a fase de estudos seguinte, de anteprojecto detalhado.

4.4 - ESTRUTURAS DO CIRCUITO HIDRÁULICO

Apresenta-se de seguida o zonamento geotécnico para cada estrutura do circuito hidráulico (Desenhos A7 a A10, em Anexo). Genericamente, descrevem-se os seguintes parâmetros: litologias atravessadas, presença de falhas, estado de meteorização e grau de fracturação do maciço rochoso, velocidade de propagação das ondas sísmicas e resistividades geoelectricas.

4.4.1 - Tomada de água e poço de comportas

As escavações para a estrutura de entrada do túnel de adução e para o poço de comportas serão realizadas em rochas metassedimentares rijas a muito rijas (micaxistos) medianamente alteradas e fracturas medianamente afastadas. A xistosidade é subvertical com orientação NW-SE.

O maciço é percorrido por várias falhas e por filões aplito-pegmatíticos. Foram referenciados vários destes filões no encontro esquerdo da barragem muito próximo da tomada de água, os quais se encontram alterados à superfície e apresentam atitudes variáveis. As falhas observam-se nos taludes dos caminhos e correspondem a zonas de material argiloso (milonite) de espessura irregular encaixadas em xistos rijos. Estes acidentes parecem

orientar-se segundo duas direcções ortogonais, NNE-SSW e WNW-ESE e são subverticais (inclinação entre 60° a 90°).

Uma das falhas, aparentemente com direcção WNW-ESE, foi intersectada pela sondagem SCIP1 aos 63 m de profundidade, justificando a essa profundidade permeabilidades elevadas (25 Lu) e $10 < \text{GSI} < 30$.

Relativamente à compartimentação do maciço, verifica-se a existência de um número significativo de fracturas com atitude dispersa. No entanto, a xistosidade e a fracturação agrupam-se tendencialmente nas famílias referidas no Quadro 4-26.

Quadro 4-26 – Compartimentação do maciço na tomada de água (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$135^\circ \pm 10^\circ$	$080^\circ \pm 5^\circ$
Diaclases:		
Família 1	$025^\circ \pm 10^\circ$	$085^\circ \pm 5^\circ$
Família 2	$030^\circ \pm 20^\circ$	$045^\circ \pm 20^\circ$
Família 3	$155^\circ \pm 15^\circ$	$080^\circ \pm 10^\circ$
Família 4	$075^\circ \pm 30^\circ$	$030^\circ \pm 10^\circ$

O estudo da compartimentação do maciço para este local da obra apresenta-se no Desenho A4 em Anexo.

A caracterização geotécnica do maciço foi feita com base no perfil sísmico PSCIP2, na sondagem SCIP1 e numa antiga galeria, situada a cerca de 30 m para NW da entrada do túnel.

Na escavação a céu aberto para o emboquilhamento do túnel, os xistos encontram-se cobertos por depósitos de vertente com espessura que pode atingir 1 a 2 m. Junto ao poço das comportas estes depósitos praticamente não existem.

A parte superior dos micaxistos apresenta-se, até cerca de 5 m de profundidade muito alterada a decomposta, sendo ripável com mais ou menos facilidade ($V_P < 2200$ m/s). Nas zonas de acidentes geológicos este horizonte de alterações poderá atingir maiores profundidades. Inferiormente, os micaxistos tornam-se mais compactos, com fracturas medianamente afastadas (F_3 , podendo ocorrer intercalações F_2 e F_4), pouco alterados a sãos (W_{1-2}) e muito rijos.

Em termos de zonamento geotécnico, efectuado com base nos resultados da sondagem SCIP1, prevê-se os horizontes definidos no Quadro 4-27 (Desenho A7 em anexo).

No que diz respeito às condições de percolação de água através do maciço, serão de esperar caminhos fáceis de percolação através de fracturas abertas até cerca de 30 m de profundidade, com excepção das zonas de falha, onde as permeabilidades elevadas poderão atingir profundidades superiores. Inferiormente o maciço será, em geral, pouco permeável.

Quadro 4-27 – Horizontes geotécnicos na tomada de água (Cenorgeo, 2009b).

Profundidade (m)	GSI
<5	10 - 30
5-15	30 - 50
>15	50 - 70

4.4.2 - Túnel de adução

O túnel de adução desenvolve-se em formações metassedimentares do Silúrico, constituídas por uma alternância de micaxistos muito siliciosos, rijos, e de xistos pelíticos, mais brandos. Estas formações são atravessadas por filões aplito-pegmatíticos e de quartzo. A alternância entre xistos mais rijos e mais brandos é posta em evidência pela ocorrência de várias cristas que correspondem a afloramentos de rocha mais siliciosa e mais rija, que desaparece lateralmente, passando a rocha pelítica mais branda. Estes afloramentos têm uma orientação sensivelmente paralela à xistosidade e os de maior dimensão foram cartografados e estão representados nos Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo, em planta e perfil geotécnico à escala 1:4 000.

Apesar desta alternância, dados obtidos da observação de superfície e das sondagens, parecem indicar uma predominância de xistos siliciosos, mais rijos, até cerca do PK 0+800. A partir deste ponto, o maciço apresentava uma alternância de xistos rijos e de xistos brandos até à zona da chaminé de equilíbrio.

Ao longo do túnel de adução o maciço é, alternadamente, aflorante e subaflorante. Os afloramentos nas zonas de xistos siliciosos mais rijos constituem corpos rochosos de dimensões que atingem, em alguns casos, várias dezenas de metros de extensão e que se encontram geralmente medianamente alterados (W_3), com fracturas medianamente afastadas e próximas ($F_{3,4}$). Os afloramentos de rochas, mais pelíticas, são menos

persistentes e geralmente medianamente alterados e alterados ($W_{3,4}$), com fracturas medianamente afastadas e próximas ($F_{3,4}$). Em profundidade, o maciço estará tendencialmente menos alterado (W_{1-2} e $W_{2,3}$) e com fracturas medianamente afastadas e próximas ($F_{3,4}$). Nas zonas de acidentes geológicos, o maciço deverá estar consideravelmente mais alterado (W_{4-5}) e fracturado (F_{4-5}).

A observação de fotografia aérea, os levantamentos de terreno e a prospecção geoelectrica revelaram zonas de contraste significativo em termos de resistividades, permitiram concluir que existem diversos alinhamentos estruturais/fraqueza ao longo do túnel, que corresponderão a zonas de falha ou a zonas de maior alteração e fracturação, com presença significativa de água.

Os alinhamentos detectados coincidem, geralmente, com zonas que revelaram valores de resistividade eléctrica baixos, 250 – 1000 $\Omega.m$, e têm correspondência à superfície com zonas mais alteradas e/ou tectonizadas, ou de transição de xistos rijos para xistos brandos. De sublinhar que estes alinhamentos cruzam o eixo do túnel com grande obliquidade (30° a 35°), o que irá condicionar fortemente a estabilidade da escavação.

Relativamente à compartimentação do maciço, verifica-se uma grande aleatoriedade na orientação das descontinuidades observadas à superfície, no entanto é possível distinguir alguma tendência, quando se individualizam as fracturas do trecho até à zona de maior recobrimento (da tomada de água até ao PK 1+450) e a seguir à zona de maior recobrimento (PK 1+450 até à câmara da válvula de protecção). Desta forma, para o primeiro trecho considerado, as atitudes de xistosidade e de fracturação agrupam-se, tendencialmente nas famílias principais referidas no Quadro 4-28.

Quadro 4-28 – Compartimentação do maciço ao longo do túnel de adução, da tomada de água ao PK 1+450 (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$130^\circ \pm 10^\circ$	$070^\circ \pm 15^\circ$
Diaclases:		
Família 1	$000^\circ \pm 10^\circ$	$075^\circ \pm 15^\circ$
Família 2	$020^\circ \pm 10^\circ$	$075^\circ \pm 15^\circ$
Família 3	$135^\circ \pm 15^\circ$	$070^\circ \pm 20^\circ$

O estudo da compartimentação do maciço para este local da obra apresenta-se nos Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo.

Em termos de inclinação, verifica-se que 80% das fracturas, de um total de 113 medições, são subverticais (inclinação $\geq 60^\circ$), 15% têm inclinações entre 30° e 60° e as restantes 5% têm inclinações inferiores a 30° .

No segundo trecho, depois do PK 1+450, a xistosidade e o diaclasamento agrupam-se nas famílias principais que constam do Quadro 4-29.

Quadro 4-29 – Compartimentação do maciço no túnel de adução, PK 1+450 à câmara da válvula de protecção (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$125^\circ \pm 5^\circ$	$065^\circ \pm 10^\circ$
Diaclases:		
Família 1	$035^\circ \pm 15^\circ$	$085^\circ \pm 5^\circ$
Família 2	$105^\circ \pm 15^\circ$	$060^\circ \pm 20^\circ$
Família 3	$165^\circ \pm 15^\circ$	$070^\circ \pm 15^\circ$

Verifica-se que 70% das fracturas, de um total de 142 medições, são subverticais (inclinação $\geq 60^\circ$), 25% têm inclinações entre 30° e 60° , e os restantes 5% têm inclinações inferiores a 30° .

Para obtenção do valor de RMR, a análise das atitudes de fracturação indica a existência, praticamente constante, de pelo menos uma família de facturas (Família 3) com orientação muito desfavorável em relação à direcção do túnel.

Relativamente ao comportamento geomecânico do maciço, de acordo com as informações disponíveis, o túnel de adução atravessará um maciço de qualidade predominantemente razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$) até cerca do PK 1+100, o que coincide aproximadamente com o trecho onde se verifica uma predominância de micaxistos mais rijos. Do PK 1+100 até cerca do PK 1+900, admite-se, pelo que se observou à superfície, que o túnel atravessará um maciço de qualidade alternadamente razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$) e medíocre a razoável ($30 < \text{GSI} < 50$). Esta zona inclui o trecho de maior recobrimento e é atravessada por vários acidentes geológicos o que, aliada à ocorrência de passagens mais significativas de xistos pelíticos brandos, deverá contribuir para maiores percentagens de maciço de qualidade má a razoável. Por se suspeitar da existência de acidentes geológicos paralelos ao túnel foi programada na fase de anteprojecto uma sondagem profunda nesta zona, com o objectivo de verificar as previsões feitas neste estudo. A partir do PK 1+900 até à zona da chaminé

prevê-se, com base na prospecção geoelectrica, alguma melhoria das condições do maciço, com a ocorrência de zonas mais extensas de micaxistos siliciosos rijos, o que se traduz numa qualidade do maciço predominante razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$). A jusante da chaminé, prevê-se um agravamento da qualidade do maciço com alternância entre qualidades medíocre a razoável e razoável a boa, com predominância da primeira.

Da análise dos elementos obtidos, sobretudo dos resultados dos ensaios Lugeon das sondagens SCIP1 e SCIP2 e do perfil de resistividade eléctrica, admite-se que o maciço se encontre alternadamente seco a saturado (com caudais afluentes à escavação de 0 a 2,5 l/min por metro de escavação) e húmido a saturado (caudais afluentes de 1 a 2,5 l/min por metro de escavação). A delimitação das zonas onde o maciço apresenta cada uma destas condições hidrogeológicas está representada na planta e perfil geotécnico à escala 1:4000, Desenhos A4, A5 e A6 em Anexo.

De referir, no entanto, que no atravessamento dos filões dever-se-á esperar afluências de água mais importantes que, em relação à orientação da estrutura, poderão propiciar instabilizações durante a escavação do túnel.

4.4.3 - Chaminé de equilíbrio

No local da chaminé, o maciço rochoso é constituído por micaxistos, ricos em quartzo de exsudação, com algumas passagens de xistos pelíticos, geralmente muito alterados (W_4) com passagens decompostas (W_5). Em profundidade ocorrem zonas de rocha medianamente e pouco alteradas ($W_{3,2}$). O maciço é atravessado por filões aplito-pegmatíticos.

Relativamente à compartimentação do maciço, verifica-se que a xistosidade e as diaclases se agrupam preferencialmente nas famílias, conforme o Quadro 4-30.

Quadro 4-30 – Compartimentação do maciço na chaminé de equilíbrio (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$130^\circ \pm 15^\circ$	$055^\circ \pm 10^\circ$
Diaclases:		
Família 1	$020^\circ \pm 10^\circ$	$085^\circ \pm 5^\circ$
Família 2	$005^\circ \pm 35^\circ$	$025^\circ \pm 10^\circ$

O local foi reconhecido pela sondagem SCIP2, onde foram realizados ensaios Lugeon a partir de 10 m de profundidade e ensaios dilatométricos.

Os testemunhos obtidos da sondagem mostram que o maciço apresenta normalmente fracturas próximas a muito próximas (F_{4-5}). As passagens de rocha mais compacta com fracturas medianamente afastadas (F_3), ocorrem esporadicamente. Também se verificou, com alguma frequência, perda parcial de testemunho.

Da análise global das informações obtidas durante a execução dos 3 furos necessários para concluir a sondagem SCIP2, pode concluir-se o seguinte (Desenho A8 em Anexo).

- a) o maciço onde será escavado o poço da chaminé de equilíbrio apresenta-se, na sua extensão, bastante heterogéneo, geralmente muito alterado, com fracturas próximas, por vezes muito próximas;
- b) a qualidade do maciço é média a fraca, não melhora significativamente em profundidade e, lateralmente, deverão ser esperadas grandes variações;
- c) os valores de GSI variam, em média entre 30 e 50, com algumas ocorrências de zonas mais compactas com valores entre 50 e 70 e outras mais fracas com valores entre 10 e 30 (Desenho A8 em Anexo).
- d) no furo efectuado ao eixo do poço as zonas mais fracas ($10 < \text{GSI} < 30$) foram encontradas aproximadamente entre 36,5 e 46,0 m e 62,5 e 76,0 m.

Nos ensaios tipo Lugeon realizados ao longo do furo SCIP2 até aos 100 m de comprimento de furação obtiveram-se valores de permeabilidade inferiores a 5 Lu, revelando tratar-se de um maciço pouco permeável fora da zona afectada pelos trabalhos mineiros.

4.4.4 - Câmara de válvula e galeria de ataque

As escavações da câmara da válvula e da galeria de ataque irão desenvolver-se num maciço sensivelmente semelhante ao da chaminé de equilíbrio, constituído por alternâncias de micaxistos siliciosos rijos e de xistos pelíticos brandos.

Na galeria de ataque as condições geotécnicas do maciço estimaram-se com base nos perfis sísmicos PSCIP3 e PSCIP4. Ambos revelaram zonas localizadas, mais descomprimidas, que poderão corresponder a acidentes geológicos que irão ser atravessados pela galeria e, possivelmente, pela câmara da válvula.

Em termos de compartimentação, admite-se que esta seja equivalente à descrita no subcapítulo 4.4.3 para a chaminé de equilíbrio, próxima deste local.

Na zona de emboquilhamento, o horizonte sísmico com velocidades inferiores a 2500 m/s atinge cerca de 25 a 30 m de espessura, pelo que será de esperar um terreno de pior qualidade nas primeiras dezenas de metros, passando depois a uma alternância de terrenos de qualidade razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$) e medíocre a razoável ($30 < \text{GSI} < 50$), com passagens de qualidade fraca ($10 < \text{GSI} < 30$). Globalmente, para este trecho do circuito hidráulico foram previstas as seguintes percentagens das diferentes qualidades do maciço:

- maciço de qualidade razoável a boa, com $50 < \text{GSI} < 70$: 30%;
- maciço de qualidade medíocre a razoável, com $30 < \text{GSI} < 50$: 40%;
- maciço de qualidade fraca, com $10 < \text{GSI} < 30$: 30%.

Na zona da câmara da válvula considerou-se que o valor de GSI do maciço variaria entre 30 e 70 (Desenho A8 em Anexo).

4.4.5 - Conduta forçada

O túnel da conduta forçada vai desenvolver-se nas formações metassedimentares constituídas essencialmente por xistos pelíticos brandos com passagens de micaxistos siliciosos, mais rijos. A partir da zona do PK 3+300, o maciço parece ser principalmente constituído por xistos pelíticos brandos. Estas formações são atravessadas por filões aplito-pegmatíticos.

Pelos afloramentos, verifica-se que o maciço rochoso se encontra à superfície geralmente muito alterado (W_4) com algumas passagens medianamente alteradas (W_3) e fracturas medianamente afastadas e próximas ($F_{3,4}$).

Em profundidade, apesar de ainda não existir prospecção directa nesta zona, estima-se que ocorra uma melhoria nas condições do maciço, esperando-se alternâncias $W_{2,3}$ e $W_{3,4}$ e fracturação de grau $F_{3,4}$. Na intersecção de acidentes geológicos, admite-se que haja um agravamento das condições do maciço, encontrando-se mais alterado ($W_{4,5}$) e fracturado ($F_{4,5}$).

Relativamente à existência de acidentes geológicos, verificou-se na sondagem SCIP3 o atravessamento de xistos muito alterados a decompostos com zonas de esmagamento até cerca de 70 m de comprimento de furação. Estas zonas de esmagamento foram muito

frequentes entre 26,65 e 69,00 m, tendo-se registado perdas de testemunho e instabilidade das paredes do furo, o que obrigou à utilização de lamas bentoníticas durante a furação.

Esta formação, de muito má qualidade, associada à ocorrência de algumas zonas de esmagamento verificadas à superfície, indica que se poderá estar em presença de um importante acidente geológico subvertical com direcção WNW-ESE. De referir que o perfil PRCIP5 acusa uma variação de resistividades que se pode associar a este acidente, que mergulhará para o quadrante NE.

Foi ainda detectado pelo PRCIP5 e pela análise da fotografia aérea, um possível acidente cerca do PK 2+970. Verifica-se também a existência de mais algumas zonas com resistividades baixas na parte final da conduta que poderão estar relacionadas com a existência de outros acidentes geológicos ou resultarem simplesmente da influência das obras do aproveitamento de Bragadas.

Em termos de compartimentação do maciço, verifica-se que a xistosidade e a fracturação se agrupam nas famílias referidas no Quadro 4-31.

Quadro 4-31 – Compartimentação do maciço ao longo da conduta forçada (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$120^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$65^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Diaclases:		
Família 1	$000^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$85^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Família 2	$025^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$75^{\circ} \pm 10^{\circ}$
Família 3	$N140^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$60^{\circ} \pm 10^{\circ}$ SW

Relativamente às características geotécnicas prevê-se, em profundidade, uma alternância de terrenos de qualidade razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$) e medíocre a razoável ($30 < \text{GSI} < 50$), com predominância da última.

4.4.6 - Central subterrânea: caverna, galeria de ataque e poços

Para esta zona e fase dos estudos, dispõem-se dos resultados do perfil de resistividades PRCIP5 ao longo do eixo do circuito hidráulico e da sondagem SCIP3, situada a cerca de uma centena de metros do local escolhido para a caverna da central.

Na zona da central predominam xistos micáceos com veios de quartzo de exsudação, pouco frequentes. De um modo geral estas formações encontram-se à superfície muito alteradas e decompostas (W_{4-5}) e são pouco rijas, sendo raros os afloramentos de rocha rija, medianamente alterados e fracturados ($W_{4,3}$; $F_{3,4}$).

Como já foi assinalado anteriormente, a sondagem SCIP3 revelou a presença de um importante acidente geológico que se estima ser subvertical, com direcção WNW-ESE. Este acidente condicionou a implantação da central, originado o seu deslocamento para jusante.

Em termos de compartimentação do maciço, verifica-se que a xistosidade e as diaclases se agrupam nas famílias referidas no Quadro 4-32.

Quadro 4-32 – Compartimentação do maciço no local da central (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$105^\circ \pm 25^\circ$	$050^\circ \pm 20^\circ$
Diaclases:		
Família 1	$110^\circ \pm 25^\circ$	$070^\circ \pm 20^\circ$
Família 2	$150^\circ \pm 10^\circ$	$070^\circ \pm 10^\circ$
Família 3	$095^\circ \pm 10^\circ$	$025^\circ \pm 5^\circ$
Família 4	$020^\circ \pm 15^\circ$	$075^\circ \pm 5^\circ$

Na sondagem SCIP3 verifica-se uma melhoria acentuada do maciço a partir dos 70 m, sendo constituído por uma alternância de xistos compactos e pouco alterados e pouco fracturados ($W_{2,3}$; $F_{3,4}$), com zonas muito alteradas e muito fracturadas, às vezes esmagadas (W_{4-5} ; F_{4-5}), com sinais de passagens de água. É neste tipo de maciço que se deverá situar a caverna da central, galerias e poços, onde o GSI médio se estimou entre 50 e 55. No entanto, pode variar desde 30 a 70 (Desenho A9 em Anexo).

Até profundidades de 20 a 40 m, a confirmar pelas sondagens programadas para a fase de anteprojecto detalhado, as características geotécnicas deverão piorar francamente, predominando os terrenos de fraca qualidade ($10 < \text{GSI} < 30$).

4.4.7 - Galerias de restituição

Na zona dos túneis de acesso à central e de restituição, o maciço é constituído essencialmente por xistos pelíticos com passagens de micaxistos siliciosos mais rijos, onde se encontra cartografada uma falha, que atravessa o túnel de restituição cerca do PK 3+660,

com uma direcção muito oblíqua, aproximadamente N-S. Esta falha é visível à superfície estando cartografada na folha 6-C da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000 (DGGM, 1992). Esta informação é ainda confirmada pela existência de resistividades eléctricas baixas nesta zona. Este acidente é bastante enviesado relativamente ao túnel de restituição, pelo que a sua influência nesta obra poderá estender-se até algumas dezenas de metros. No caso do túnel de acesso à central, a zona de influência do mesmo será, à partida, menor, uma vez que a sua direcção é sensivelmente perpendicular ao eixo do túnel.

Em termos de compartimentação do maciço, verifica-se que a xistosidade e o diaclasamento se agrupam nas famílias contempladas no Quadro 4-33.

Quadro 4-33 – Compartimentação do maciço no túnel de acesso à central e túnel de restituição (Cenorgeo, 2009b).

Tipo de compartimentação	Direcção	Inclinação
Xistosidade	$150^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$035^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Diaclases:		
Família 1	$110^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$080^{\circ} \pm 10^{\circ}$
Família 2	$150^{\circ} \pm 5^{\circ}$	$075^{\circ} \pm 5^{\circ}$

Relativamente ao comportamento geomecânico do maciço, existe uma alternância de maciço de qualidade razoável a boa ($50 < \text{GSI} < 70$) e medíocre a razoável ($30 < \text{GSI} < 50$), com predominância desta última e nas proporções previstas na planta e perfil geotécnico (Desenho A9 em Anexo).

4.4.8 - Estrutura de restituição e túnel de acesso

No local de implantação da estrutura de restituição e entrada do túnel de acesso à central afloram micaxistos medianamente e pouco alterados, com algumas zonas muito alteradas.

Foram identificados alguns acidentes geológicos (falhas) subverticais com direcção variando entre N-S e NE-SW. À superfície, estes acidentes manifestam-se por zonas de rocha intensamente fracturada e alterada onde se observam, às vezes, nascentes e captações de água.

Em termos de compartimentação do maciço, admite-se que esta seja equivalente à descrita para o túnel de restituição (ver subcapítulo 4.4.7), próximo deste local.

A caracterização geotécnica do maciço foi baseada na observação dos afloramentos e nos resultados da sondagem SCIP4. Esta sondagem foi realizada a cerca de 22 m para nascente do eixo do circuito hidráulico. Até aos 14,0 m de comprimento de furação a sondagem encontrou micaxistos decompostos a muito alterados e muito fracturados. Admite-se que este horizonte reduza progressivamente de espessura da cota 220 m até ao rio. O valor do GSI é inferior a 30.

Abaixo daquela profundidade a rocha é pouco alterada a sã (W_{1-2}), medianamente e muito fracturada ($F_{3,4}$). Destaca-se o trecho entre 27,00 e 31,55 m, em que a rocha é muito fracturada, às vezes esmagada, com sinais de circulação de água (fracturas totalmente oxidadas). É provável que se trate de um dos acidentes geológicos que poderão atravessar a zona das escavações. Nesta zona e em geral, os valores de GSI deverão variar entre 30 e 70 conforme se indica no Desenho A10 em Anexo.

4.5 - ESCAVAÇÕES E SUSTIMENTOS

4.5.1 - Generalidades

Apresenta-se, em seguida, uma descrição sumária das obras de escavação a realizar, quer à superfície, quer em subterrâneo, associadas ao circuito hidráulico de Padroselos.

As soluções adoptadas pela Cenorgeo (2009c) resultaram da consideração dos cenários geológico-geotécnicos estimados na fase de anteprojecto e que foram apresentados, anteriormente, no ponto 4.4. Estes elementos, necessariamente preliminares, permitiram que a Cenorgeo (*op. cit.*) definisse e fixasse o traçado dos túneis, bem como seleccionasse os locais mais adequados para a implantação das principais estruturas a escavar, nomeadamente, a tomada de água, o poço de comportas e a chaminé de equilíbrio, as cavernas da câmara de válvulas e da central, e a estrutura de restituição.

Toda a informação geológico-geotécnica deverá ser aprofundada em fase ulterior de estudos o que, atendendo aos resultados obtidos nos trabalhos de prospecção obtidos nesta fase, conduzirá à introdução de eventuais ajustes no posicionamento das referidas estruturas. Esta situação resulta, sobretudo, do elevado número de acidentes geológicos detectados ou cartografados na bibliografia, os quais carecem de confirmação e de estudo adequado.

Para além da descrição das soluções previstas para as diversas estruturas, são também resumidas as metodologias de cálculo adoptadas nesta fase pela Cenorgeo (*ib.*).

4.5.2 - Tomada de água

A escavação a executar para a inserção da tomada de água interessa um maciço xistoso com características geomecânicas bastante variáveis, que apresenta um horizonte superficial bastante alterado, com uma espessura máxima que rondará 8,0 m.

Tendo em conta as características geológicas e estruturais do maciço, a estabilidade da escavação será condicionada, fundamentalmente, pelas descontinuidades existentes. Assim, o estudo das condições de estabilidade foi desenvolvido sobretudo com recurso a análises cinemáticas de taludes, considerando as famílias de descontinuidades identificadas durante o decurso dos trabalhos de prospecção geológico-geotécnica, para o qual se recorreu ao programa de cálculo automático SWEDGE da *RocScience*®.

Para o talude frontal do emboquilhamento do túnel de adução, a Cenorgeo (*ib.*) definiu uma escavação com um pano inferior com inclinação de 5:1 (V:H), a qual transita para uma inclinação de 2:1 (V:H) na zona mais alterada do maciço. Previu-se, ainda, uma banqueteta com 3,0 m de largura implantada à cota (420,75), coincidente com a cota de topo da estrutura da tomada de água.

Para os taludes laterais foram previstas três inclinações distintas, adoptando-se inclinações de 5:1 (V:H) e de 3:1 (V:H) no caso dos panos inferiores, inseridos na zona do maciço de melhores características, e de 2:1 (V:H), na zona superior, mais alterada e descomprimida. Foram ainda previstas duas banquetetas de 3,0 m de largura, uma à cota (414,50) e outra à cota (420,75).

A estabilidade dos taludes de escavação é ainda garantida pela adopção de um sustimento, sistemático, de contenção, constituído por betão projectado associado a pregagens, com comprimento variável, dispostas em quincôncio numa malha de 2,0 m x 2,0 m. A espessura adoptada para o revestimento de betão projectado varia entre 0,10 m, no caso de taludes definitivos e do talude frontal do emboquilhamento, e 0,07 m, nos restantes casos.

4.5.3 - Galeria em pressão

Prevê-se que as galerias em pressão possuam um revestimento, definitivo, em betão moldado, o qual apenas será armado nas zonas de piores características geomecânicas do maciço encaixante.

Para a fase de escavação foram previstos cinco revestimentos provisórios tipo (R1 a R5) a aplicar em função das reais características do maciço a aferir no decurso da escavação. Para tal foram definidos quatro intervalos de RMR, parâmetro passível de ser determinado na frente de escavação. O quinto tipo de sustimento previsto está associado ao atravessamento de zonas de falha em que a escavação será efectuada em terrenos com características de resistência e de deformabilidade muito pobres.

Com efeito, com base nos referidos intervalos de RMR e recorrendo a métodos empíricos consagrados, foram definidos os tipos de sustimentos a aplicar em cada zona, os quais são constituídos por revestimentos de betão projectado, com espessuras variáveis, incorporando fibras metálicas, pregagens do tipo *Swelllex*, com comprimentos variáveis entre 3,0 e 4,0 m, e cambotas metálicas constituídas por treliças de varão ordinário ou de perfis metálicos. Para o atravessamento de falhas, sustimento tipo R5, prevê-se ainda o recurso a pregagens de frente em fibra de vidro e a enfilagens em tubo metálico ou varão.

Com base no zonamento geotécnico estabelecido de acordo com os elementos disponíveis nesta fase, definiram-se as percentagens de aplicação de cada um dos diferentes revestimentos provisórios tipo, as quais permitiram estimar as quantidades das diferentes naturezas de trabalho constituintes dos diferentes revestimentos provisórios tipo previstos.

4.5.4 - Poço de comportas e chaminé de equilíbrio

Um dos tipos de obra importantes que integram o circuito hidráulico do aproveitamento hidroelétrico de Padroselos é o associado à execução de poços de profundidade elevada.

Os dois poços de maior dimensão são o de comportas e o da chaminé de equilíbrio, ambos verticais e com profundidades de 50 e 102 m, respectivamente, e com os diâmetros já referidos (Quadro 3-2).

No caso do poço da chaminé de equilíbrio, existe ainda um pequeno trecho em túnel associado para assegurar a ligação ao túnel de adução.

A solução construtiva prevista para estas estruturas pressupõe a criação de acessos às plataformas a executar à superfície, no topo dos poços, bem como a construção simultânea das obras subterrâneas que permitam o acesso à base dos mesmos. Deste modo, será possível executar, previamente, um poço de menores dimensões recorrendo à tecnologia de escavação “raise-boring”, o qual servirá para a remoção dos escombros devidos ao avanço, ascendente, da escavação de alargamento e da aplicação dos sustimentos previstos.

Para a estimativa do sustimento a aplicar com o avanço das escavações de alargamento, desenvolveram-se dois tipos de análises distintas. Numa primeira análise, efectuaram-se vários cálculos recorrendo ao método convergência-confinamento que permitiram averiguar a necessidade de sustimento e avaliar as convergências das secções a diferentes profundidades. Esta análise foi desenvolvida com base nos parâmetros de resistência e de deformabilidade derivados a partir das características do maciço, nomeadamente das estimativas efectuadas para o valor de GSI (Cenorgeo, 2009c).

A outra análise desenvolvida está relacionada não só com as características geológicas do maciço, mas também com a sua estrutura, isto é, com as descontinuidades existentes no maciço e as suas características de resistência. Foi estudada a estabilidade de potenciais blocos passíveis de se formarem em torno das escavações, considerando as famílias de descontinuidades identificadas durante o decurso dos trabalhos de prospecção geológico-geotécnica e já referidas, recorrendo ao programa de cálculo automático UNWEDGE da *RocScience*[®].

Os sustimentos tipo a aplicar são constituídos por betão projectado com espessuras associados a redes electrossoldadas e pregagens com comprimentos variáveis, entre 4,0 e 8,0 m.

4.5.5 - Caverna da câmara de válvulas e galeria de acesso

No caso do circuito hidráulico do aproveitamento de Padroselos, a câmara de válvulas consiste numa caverna subterrânea localizada a uma profundidade de cerca de 80 m, acessível por uma galeria de acesso com dimensões que permitam a entrada de todos os equipamentos necessários para as fases de escavação e de exploração do empreendimento.

À excepção das suas dimensões mais reduzidas, esta caverna é em tudo semelhante à da central, que descreve adiante. Assim e face à qualidade mediana do maciço, o sustimento definido (Cenorgeo, *op. cit.*) betão projectado, incorporando fibras metálicas, associado a pregagens em varão, do tipo Dywidag[®], de resistência elevada, sistemáticas. Tal como na caverna da central, durante a fase de escavação será construído o arco em betão armado do revestimento, ao nível da abóbada, que permitirá depois manobrar os equipamentos a serem instalados no seu interior.

Na definição dos sustimentos a aplicar na galeria de acesso, foram adoptadas as metodologias utilizadas em galerias em pressão. Refere-se que a Cenorgeo (*ib.*) adoptou um sustimento com cambotas na proximidade da caverna de modo a evitar interferências complexas entre pregagens.

4.5.6 - Conduta forçada

No circuito hidráulico em estudo prevê-se que a conduta forçada, dada a sua reduzida inclinação, seja executada através de um método de escavação sequencial (NATM) semelhante ao que será utilizado na execução das restantes galerias.

Assim, foi igualmente prevista a instalação de cinco tipos sustimentos (R1 a R5) a aplicar em função das reais características do maciço a escavar, que serão aferidas no decurso da escavação e em função dos valores de RMR determinados na respectiva frente.

Com base nos de RMR e recorrendo a métodos empíricos consagrados, foram definidos os sustimentos a aplicar em cada zona e para as diferentes secções, os quais serão constituídos por (*ib.*): betão projectado, com espessuras variáveis, incorporando fibras metálicas, associado a pregagens do tipo Swellex[®] com comprimentos oscilando entre 3,0 e 4,0 m, e ainda cambotas metálicas constituídas por treliças de varão ordinário ou por perfis metálicos. Para o atravessamento de falhas, prevê-se o sustimento tipo R5, que incluirá ainda pregagens de frente em fibra de vidro e a enfilagens em tubo metálico ou varão.

4.5.7 - Central, galerias de acesso e poços de barramentos

As estruturas subterrâneas que constituem o complexo da central são essencialmente de três tipos: a caverna dos grupos, os poços de barramentos e as galerias de acesso e de ataque que ligam as várias obras e que dão acesso à superfície.

O poço de barramentos atinge uma profundidade máxima próxima de 80,0 m que corresponde, aproximadamente, à profundidade média da caverna da central. As dimensões das galerias de acesso resultam das exigências impostas pelo transporte dos equipamentos para o interior da caverna. Durante a fase de construção, estas galerias garantirão o acesso a diversas frentes de ataque à escavação da caverna e do poço de barramentos. O emboquilhamento destas galerias preconiza-se que seja próximo da estrutura de restituição, cerca da cota (234,00).

Na definição das galerias e dos poços foram adoptadas as metodologias já descritas a propósito de outras estruturas subterrâneas de tipo semelhantes (Cenorgeo, 2009c). Para a escavação subterrânea associada à caverna da central e apesar da fase ainda preliminar de estudos em que o seu projecto se encontra, considerou a Cenorgeo (*op. cit.*) importante realizar estudos mais evoluídos de estabilidade do maciço rochoso para a zona envolvente à caverna. Assim, recorreu a modelos numéricos bidimensionais que permitiram avaliar o estado de tensão e deformação do maciço nessa zona, mormente os níveis de plastificação associados, obtendo algumas indicações do comportamento da obra subterrânea. Estas análises foram efectuadas com recurso ao programa de cálculo de elementos finitos Plaxis®. Em estudos complementares deverão ser realizados cálculos tridimensionais, os quais permitirão uma correcta avaliação do comportamento de todas as estruturas subterrâneas associadas ao complexo da central.

4.5.8 - Restituição

A escavação a executar para a inserção da estrutura de restituição deste circuito hidráulico interessa um maciço rochoso de natureza xistenta, tendo sido identificados alguns acidentes geológicos na respectiva zona de implantação.

O maciço apresenta um horizonte de alteração superficial com espessura de cerca de 7,0 m, enquanto que em profundidade apresenta características geomecânicas boas, exibindo, no entanto, grande heterogeneidade.

Tendo em conta as características geológicas e estruturais do maciço, a estabilidade da escavação é condicionada fundamentalmente pelas discontinuidades existentes, sobretudo pela xistosidade, que constitui um plano de baixa resistência. Assim, o estudo das condições da sua estabilidade, numa primeira abordagem, foi desenvolvido pela Cenorgeo (*op. cit.*) sobretudo com recurso a análises cinemáticas dos taludes, considerando as famílias de discontinuidades identificadas no decurso dos trabalhos de prospecção geotécnica, para o

qual se recorreu aos programas de cálculo automático SWEDGE e ROCPLANE da RocScience®.

Complementarmente, foi feita uma análise através do método das fatias em que se recorreu ao programa SLIDE da RocScience®.

Para o talude frontal do emboquilhamento do túnel de restituição definiu-se uma escavação em que o pano inferior tem uma inclinação de 5:1 (V:H), a qual transita para as inclinações de 3:1 (V:H) e de 2:1 (V:H) nos panos mais superficiais. Previu-se, ainda, a realização de quatro banquetas com 3,0 m de largura às cotas (211,00), (219,00), (227,00) e (234,00), esta última materializada à cota a que se desenvolverá a plataforma do túnel de acesso à central. A solução para o talude localizado a nascente prevê-se semelhante à do talude frontal do emboquilhamento e foi fortemente condicionado pela xistosidade, a qual apresenta um pendor muito desfavorável. Assim, foram adoptadas inclinações de 3:1 (V:H) e de 2:1 (V:H), (Cenorgeo, 2009c).

A estabilidade dos taludes de escavação é ainda garantida pela instalação de um sustimento sistemático de contenção, constituído por betão projectado associado a pregagens dispostas em quincôncio. No caso do talude frontal do emboquilhamento e do talude localizado a nascente, as pregagens estão dispostas numa malha de 2,0 m x 2,0 m, com comprimentos variáveis. A espessura adoptada para o revestimento de betão projectado varia entre 0,10 m, no caso de taludes definitivos e do talude frontal do emboquilhamento, e 0,07 m, nos restantes casos (*op. cit.*).

No caso do talude localizado a poente, para além do revestimento em betão projectado já descrito, a Cenorgeo (*op. cit.*) preconizada duas paredes ancoradas em betão projectado armado, cada uma com dois níveis ancorados de 600 kN de capacidade, os quais permitem garantir a estabilidade da escavação face à orientação e inclinação muito desfavorável dos planos de xistosidade identificados.

4.6 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO COMPLEMENTARES

Posteriormente à fase de anteprojecto e tendo em vista a obtenção de elementos que permitam uma melhor e completa caracterização geotécnica do maciço onde se pretendem implementar as estruturas subterrâneas, bem como o estudo de alguns dos acidentes geológicos identificados no levantamento de terreno, prevêem-se realizar mais 9 sondagens

à rotação com recuperação contínua de testemunhos (SCIP5 a SCIP13), ensaios *in situ* e em laboratório sobre amostras recolhidas nas sondagens, bem como um perfil de resistividades geoeléctricas (PRCIP5), entre a chaminé de equilíbrio e a restituição, visto este já estar previsto na fase de anteprojecto, mas não ter sido executado (Quadro 4-34).

As quatro sondagens que se programam para a 2ª fase de prospecção ao longo do túnel de adução (SCIP5, SCIP6, SCIP7 e SCIP8), destinam-se, essencialmente, a reconhecer as características do maciço onde se suspeita da existência de uma ou várias falhas paralelas ao eixo, que se manifestam à superfície pelo aparecimento de zonas muito alteradas e húmidas (pequenas nascentes). Caso estas condições verificadas à superfície se mantenham em profundidade, serão bastante gravosas para a abertura do túnel numa grande extensão, pelo que se justifica o seu adequado reconhecimento.

Concluída a fase de prospecção preliminar, não existe qualquer reconhecimento orientado para a solução em túnel da conduta forçada entre a chaminé de equilíbrio e a central e, portanto, foram programadas duas sondagens (SCIP9 e SCIP10) nesta zona. Com o objectivo de recolha de informação mais completa sobre as características do maciço na Central Subterrânea, programou-se mais uma sondagem (SCIP11) com a realização de ensaios tipo Lugeon, dilatométricos e obtenção de provetes a partir dos tarolos recolhidos na furação, bem como a realização da SCIP12, com maior diâmetro, para viabilizar a execução de ensaios STT.

Com o objectivo de reconhecer uma das falhas indicadas na Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000 na zona em que se prevê vir a intersectar os túneis de acesso à central e o de restituição, foi programada mais uma sondagem (SCIP13).

As sondagens complementares previstas encontram-se no Quadro 4-34.

Quadro 4-34 – Características dos trabalhos de prospecção previstos associados a cada uma das sondagens a realizar (Cenorgeo, 2009b, adaptado).

Sondagem nº	Local	Comprimento estimado (m)	Inclinação c/ a horizontal	Azimute	Ensaio previstos	Tarolos para provetes
SCIP5	Túnel de adução	100	60°	218°	Lugeon; 4 RCU e Dureza e abrasividade Cerchar	4
SCIP6	Túnel de adução	100	60°	236°		
SCIP7	Túnel de adução	210	70°	236°		
SCIP8	Túnel de adução	100	60°	236°		
SCIP9	Conduta forçada	110	70°	146°	1 Perfil de resistividades, 10 Lugeon em cada sondagem, 4 dilatométricos na SCIP10	-
SCIP10	Conduta forçada	195	70°	146°		
SCIP11	Central	150	60°	146°	10 Lugeon e dilatométricos; 8 RCU e Abrasividade Cerchar	8
SCIP12	Central	100	90°	-	4 STT; 3 Triaxiais, 20 de deslizamento de diaclases.	23
SCIP13	Túnel de restituição	90	70°	236°	Lugeon; 3 Triaxiais	3

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um circuito hidráulico consiste num conjunto de estruturas que possibilitam que a água contida na albufeira de uma barragem possa produzir energia eléctrica, de forma contínua, não poluente, sem elevado impacte ambiental e de modo relativamente económico quando comparado com outras formas.

Um aproveitamento hidroeléctrico compreende geralmente: a barragem, para armazenamento de água, a tomada de água e, em seguida, em regra um túnel de acesso, conduta forçada, se a energia potencial da água na albufeira for muito significativa, central hidroeléctrica, à superfície ou subterrânea, às vezes uma chaminé de equilíbrio, e um túnel/conduto de restituição.

De uma forma geral, um circuito hidráulico, caracteriza-se como sendo uma obra linear, em túnel ou conduta, excepto no caso de estruturas particulares que o compõem, como são, a tomada de água, poço de comportas, poço de cabos e chaminé de equilíbrio, realizadas em poço, e a central hidroeléctrica, que no caso de ser subterrânea, é construída em caverna. Devido às condições geológicas e geotécnicas exigidas por este tipo de obras, só se realizam em maciços rochosos, caso contrário os custos associados seriam muito elevados bem como não se teriam diferenças de cotas significativas para a produção de energia se os maciços não fossem rochosos.

Os aspectos gerais mais importantes no estudo destes circuitos são a caracterização litológica dos terrenos, a respectiva caracterização estrutural, sobretudo no que se refere às descontinuidades que afectam o maciço e as condições hidrogeológicas. Dever-se-á contemplar a caracterização dos diferentes materiais rochosos, a geometria e a natureza da fracturação, os acidentes geológicos, o estado de tensão inicial (no caso de recobrimento elevado) e as propriedades hidráulicas do maciço. Todos estes aspectos têm importância fundamental, quer na escolha do método de escavação mais indicado, quer na definição da necessidade e do tipo de sustimento.

Após a definição inicial das características geológicas das formações que, em certos casos, poderá ser suficiente para o esboçar da obra, segue-se a caracterização geotécnica dos terrenos visando o seu zonamento. Essa caracterização é, geralmente, efectuada com base em prospecção, geofísica e mecânica, complementada pela realização, quer de ensaios *in situ*, quer de ensaios de laboratório.

As diferentes fases de estudos de projecto, têm como objectivo determinar com um grau crescente de detalhe, a natureza e o comportamento geotécnico do local à implementação da obra. A fase de estudo prévio consiste na recolha bibliográfica, reconhecimento geológico de superfície e realização dos primeiros trabalhos expeditos de prospecção com o objectivo de definir o traçado adequado à implementação da obra. Na fase de anteprojecto iniciam-se os trabalhos de prospecção e ensaios, quer *in situ*, quer em laboratório recorrendo a técnicas menos sofisticadas e de menor custo, com o objectivo de efectuar um primeiro zonamento geotécnico do maciço em estudo, estimar os parâmetros geomecânicos do mesmo e avaliar, preliminarmente, os métodos de escavação e sustimento; posteriormente estes estudos são complementados na fase seguinte, de anteprojecto detalhado.

A mestranda realizou um estágio na empresa CENORGE – Engenharia Geotécnica, Lda., onde acompanhou o estudo de anteprojecto de dois locais para aproveitamentos hidroeléctricos no Alto Tâmega. Um deles, que se detalhou ao longo deste texto, corresponde ao local previsto para a implantação do circuito hidráulico da barragem de Padroselos e que se insere, do ponto de vista morfoestrutural, no limite da Zona Centro Ibérica com a subzona Galiza Média - Trás-os-Montes da Península ibérica. Desenvolve-se em formações pertencentes ao Maciço Hespérico, correspondentes à cadeia orogénica varisca europeia, constituída essencialmente por formações ante-câmbrias e paleozóicas de natureza fundamentalmente xistenta e granítica, bem como alguns afloramentos de rochas quartzíticas, mais resistentes e proeminentes no relevo da região encobertas, às vezes, por alguns depósitos de cobertura (Ribeiro *et al.*, 2000).

A barragem de Padroselos será implantada numa secção medianamente encaixada do rio Bessa, com orientação aproximada de NE, a cerca de 500 m a montante do açude do aproveitamento mini-hídrico de Bragadas. O vale é aproximadamente simétrico e de inclinação moderada, com ambas as vertentes inclinando cerca de 30°. O maciço metassedimentar em que deverá ser fundada a barragem, é constituído essencialmente por xistos com orientação muito uniforme, transversalmente ao vale, com inclinação geral entre 80 e 90° para montante.

No que se refere ao circuito hidráulico, entre a tomada de água e a restituição no rio Tâmega, este apresenta um alinhamento recto com uma extensão aproximada de 3,8 km e inclui as seguintes estruturas: tomada de água, poço de comportas, galeria em pressão, chaminé de equilíbrio, câmara de válvulas, conduta forçada, central hidroeléctrica e restituição.

Atravessa, essencialmente, micaxistos muito siliciosos de maior dureza, com intercalações mais ou menos espessas de xistos pelíticos, mais brandos. Estas alternâncias são mais evidentes a partir do PK1+000 do túnel de adução, onde as rochas mais duras formam cristas, bem salientes, no relevo com a orientação N60°W, paralela aos planos de xistosidade/estratificação.

Na região ocorrem algumas falhas de idade hercínica, as quais apresentam orientações predominantes NNE-SSW a NE-SW, verificando-se que a rede filoneana ocorrente apresenta, preferencialmente, aquelas orientações. Salienta-se ainda a falha activa Penacova-Régua-Verim, que corresponde a um desligamento esquerdo tardivarisco pertencendo ao mesmo sistema de fracturas que o acidente Manteigas-Vilariça-Bragança, sendo-lhe subparalela e localizando-se cerca de 60 km a ocidente do local em referência.

De acordo com os sismos históricos e instrumentais registados, segundo dados compilados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica na carta de isossistas de intensidades máximas, o local de implantação da barragem e do circuito hidráulico situa-se numa zona com grau de intensidade macrossísmica máxima de VI na escala de Mercalli modificada. Segundo o RSAEEP (1983), em termos de sismicidade a barragem e o circuito hidráulico situam-se na zona sísmica D, de mais baixo risco sísmico, a que corresponde um coeficiente de sismicidade $\alpha = 0,3$.

Em resultado das informações obtidas da recolha bibliográfica e reconhecimento de superfície do local, a Cenorgeo Lda. desenvolveu um programa de prospecção geotécnica visando a determinação da natureza e características gerais do maciço, bem como a localização de acidentes que pudessem comprometer a segurança do circuito, de forma a aferir profundidades para o horizonte de maciço mais compacto, as suas características estruturais e hidrogeológicas, assim como a presença de alguns acidentes geológicos. No geral, executou-se o seguinte programa de prospecção e ensaios:

- 8 perfis sísmicos de refração com linhas de base entre 96 e 120 m;
- 5 perfis de resistividade com comprimentos entre 330 e 3800 m;
- 4 sondagens mecânicas à rotação carotadas com comprimento de furação entre 60,35 e 180,30 m, com inclinações compreendidas entre 60° e 90°;
- 64 ensaios Lugeon, em trechos de 5 m, com 3 ou 5 patamares de pressão;
- 6 ensaios dilatométricos, com 3 ciclos de carga e descarga às pressões máximas de $P_1=3,0$ MPa, $P_2=6,0$ MPa e $P_3=9,0$ MPa;
- 2 ensaios de identificação física para determinação da massa volúmica e porosidade;
- 110 ensaios de compressão pontual;

- 9 ensaios de compressão uniaxial;
- 9 ensaios ultrassónicos;
- 3 ensaios de perfurabilidade;
- 6 ensaios de abrasividade (Cerchar).

Com base na informação recolhida, a Cenorgeo Lda. procurou definir um programa de prospecção geotécnica antes da fase de estudos seguinte, de modo a obter informação adicional que permitisse uma melhor e mais completa caracterização geotécnica do maciço a interessar pelas diversas estruturas e reconhecer alguns dos acidentes geológicos, já identificados no decorrer do levantamento de campo e pelos métodos de prospecção, directa e indirecta, utilizados neste anteprojecto. Contudo, por solicitação do dono de obra, a Iberdrola, a mesma não se veio a realizar, pelo que alguns dos trabalhos de prospecção e ensaios previstos inicialmente foram suspensos, e desta forma não foi possível desenvolvê-los e apresentá-los.

Assim, com os resultados obtidos e com base nos parâmetros determinados, foi possível realizar um zonamento preliminar do maciço (Quadro 4-21), onde se definiram quatro zonas geotécnicas, designadas de ZG3, ZG2B, ZG2A e ZG1, das quais as três primeiras foram as mais detectadas pelos métodos de prospecção directa. A Zona ZG1, de melhor qualidade, foi marginalmente atravessada, evidenciando o estado de meteorização e fracturação dos terrenos do soco a interessar. Neste zonamento não se consideraram os dados de campo de ensaios dilatométricos, que correspondiam apenas a meia dúzia de horizontes ensaiados.

No geral, preconizam-se actualmente métodos mecânicos para o desmonte das diversas zonas geotécnicas, alguns mais potentes; podendo ser necessários explosivos. Os sustimentos a aplicar em cada zona (Cenorgeo, 2009c) variam consoante o tipo de estrutura e em função do recobrimento, da litologia, características geomecânicas e estruturais do terreno, e incluem os tipos usuais neste tipo de obras: desde pregagens, com tipos e comprimentos variáveis, às vezes com betão projectado, malha electrossoldada e, nos casos piores, cambotas metálicas; em escavações superficiais, preconizou-se ainda a adopção de taludes com banquetas e inclinações variáveis, com taludes mais suaves para menores profundidades.

O programa de prospecção complementar proposto (Cenorgeo, 2009c) inclui:

- 9 sondagens adicionais à rotação com recuperação contínua de testemunhos (SCIP5 a SCIP13) assim distribuídas: quatro ao longo do túnel de adução (SCIP5, SCIP6, SCIP7

e SCIP8); duas (SCIP9 e SCIP10) na zona de túnel da conduta forçada entre a chaminé de equilíbrio e a central e outra duas (SCIP11 e SCIP12, esta com maior diâmetro, para viabilizar a execução de ensaios STT) na futura caverna; finalmente, uma na zona onde se prevê que uma falha intersecte os túneis de acesso à central e de restituição;

- 1 perfil de resistividades geoelectricas (PRCIP5), entre a chaminé de equilíbrio e a restituição, que não foi executado na fase de anteprojecto;
- ensaios *in situ* (Lugeon, dilatométricos e STT);
- e ensaios em laboratório (resistência à compressão uniaxial, deslizamento de diaclases, triaxiais e dureza e abrasividade Cherchar) sobre amostras recolhidas nas sondagens,

No desenrolar do presente trabalho, não foi possível à mestrandia desenvolver um acompanhamento contínuo dos estudos desenvolvidos tendo participado, activamente, no estudos das descontinuidades, geral para todo o circuito e para cada estrutura, e pontualmente no zonamento geotécnico preliminar do maciço.

Uma vez que junto ao traçado se observaram, frequentemente, nascentes de água ao longo de alinhamentos tectónicos, revelando que o túnel atravessará aquíferos com cotas piezométricas elevadas, associados as zonas mais fracturadas do maciço, considera-se que deve ser prestada particular atenção a este aspecto no desenrolar do anteprojecto detalhado e da construção da obra, no último caso adequando em conformidade o plano de observação previsto para a mesma.

Para o futuro, recomenda-se ainda que toda a informação geocientífica relativa a esta e próximas fases de projecto (anteprojecto detalhado e construção) seja arquivada em formato digital, de preferência sob a forma de uma base de dados georreferenciados, para que seja possível a sua rápida consulta e análise, bem como possa ser utilizada na modelação geotécnica, 3D, em fase de obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D3967 (2004). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA; Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.

ASTM D5607 (2004). Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. ASTM International, West Conshohocken, PA; Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.

ASTM D5731 (2004). Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock. ASTM International, West Conshohocken, PA; Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.

ASTM D7012 (2004). Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA; Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.

BARTON, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 39, pp. 185-216.

BASTOS, M. (1998). “A geotecnia na concepção, anteprojecto detalhado e execução de túneis em maciços rochosos”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Georrecursos – Área de geotecnia. Lisboa, Instituto Superior Técnico.

BELL F.G., ed. (1987). *Ground engineer's reference book*. London: Butterworth, 1187 pp.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). “Engineering Rock Mass Classifications”. New York: Wiley & Sons, 251pp.

BREKKE, T. e RIPLEY, B. (1987). “Design guidelines for pressure tunnels and shafts”. Electric Power Research Institute, Research Report AP-5273, USA.

BROCH, E. (1982). Designing and excavating underground power plants. Water Power and Dam Construction, Vol. 34, No. 4.

BRULAND, A. (1998). “Drillability test methods”. Doctoral thesis for the degree of doktor ingenier, Faculty of Engineering Science and Technology, Thronheim.

CABRAL J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. Memórias dos Serv. Geol. Portugal, 31:1-237.

CARVALHO, E. C. (2007). “Anexo Nacional do Eurocódigo 8. Consequências para o dimensionamento sísmico em Portugal. FEUP, Porto (policopiado).

CEN (2003). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Final Draft prEN 1998-1”. Brussels: European Committee for Standardization, December, 229 pp.

CENORGEO – Engenharia Geotécnica, Lda. (2009a). “Aproveitamento de Padroselos. Relatório geológico-geotécnico 1ª Fase”. Relatório não publicado, Lisboa, Abril.

CENORGEO (2009b). “Aproveitamento de Padroselos. Relatório geológico-geotécnico, Final”. Relatório não publicado, Lisboa, Setembro.

CENORGEO (2009c). “Anteprojecto. Memória de Síntese”. Relatório não publicado, Lisboa, Novembro.

CENORGEO (sem data). “Reconhecimento geológico, Prospeção mecânica e Ensaio in situ”. Base de dados, não publicada, Lisboa.

COBA & PROCESL (2007). Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico, PNBEPH; Anteprojecto detalhado de Programa, Memória.
<http://pnbeph.inag.pt/np4/documentos.html>; consultado em: Setembro, 2009.

DEERE, D.U. (1989). “Rock quality designation (RQD) after 20 years”. Vicksburg: USACE, GL-89-1 (policopiado).

DGGM – Direcção Geral de Geologia e Minas (1992). “Carta Geológica de Portugal, escala 1:50.000, Folha 6C – Cabeceiras de Basto”. Lisboa.

FARIAS, P.; GALLAASSTEGUI, G.; LODEIRO, F. G.; MARQUINEZ, J.; PARRA, L. M. M.; CATALÁN, J. G. P. & FERNANDEZ, L. R. R. (1987). “Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafia y estructura de Galicia Central”. In: IX Reunión sobre a Geologia do Oeste Peninsular, Porto, 1985. Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto: 441 – 431.

FERNANDEZ-BOLLO, M. & FOYO, A. (1997). “Geophysical investigations on La Rienda Tunnel, northern Spain”. Rotterdam: A. A. Balkema; World Tunnel Congress 97, Vienna, Austria, 12-17 April 1997, Volume/Band 1, pp. 145-149.

GONZALÉZ, R. (1997). “Excavación con máquinas integrales: topos e escudos”. In: C. López Jimeno (ed.), Manual de túneles y obras subterráneas, Madrid: Entorno Grafico, S. L., pp. 265-287.

HOEK, E. (2006). “Practical Rock Engineering”.
<http://www.rocsience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp> ; Last Updated: February 7.

HOEK, E. & BROWN, E. T. (1980). “Underground Excavations in Rock”. London: Institution of Mining and Metallurgy.

IGE – Instituto Geográfico do Exército (1997). “Carta Militar de Portugal, escala 1: 25.000, Folhas 59 e 73”. Lisboa, 2ª edição.

IGM – Instituto Geológico e Mineiro (2000). “Carta Geológica de Portugal, escala 1:200.000, Folha 2”. Alfragide, 1ª edição.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978a). “Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression”. ISRM Commission, Lisbon.

ISRM (1978b). “Suggested Method for Determining Tensile Strength of Rock Materials”. ISRM Commission, Lisbon.

ISRM (1978c). “Suggested Method for Determining Sound Velocity”. ISRM Commission, Lisbon.

ISRM (1979). “Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials”. ISRM Commission, Lisbon.

ISRM (1981). “Basic geotechnical description of rock masses”. Commission on Classification of Rock and Rock Masses, Document n. 1, Lisbon.

ISRM (1985). "Suggested Method for Determining Point Load Strength". ISRM Commission, Lisbon.

ISRM (1999). Suggested Method for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression. ISRM Commission, Lisbon.

JOHASEN, P.; KJAERNSLI, B. & LIEN, R. (1982). "The performance of a high pressure propane storage cavern in unlined rock, Rafnes, Norway". Norwegian Hard Rock Tunnelling, Nº 1.

LAMAS, L.N. (1993). "Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels". Ph.D. thesis, Imperial College, London.

LANG, T. (1971). Underground rock structures challenge the engineer. *In*: "Symposium on Underground Rock Chambers", Arizona.

LIMA, C.; RESENDE, M.; PACIÊNCIA, N. & ESTEVES, C. (2001). Venda Nova II hydroelectric scheme. Powerhouse geotechnics and design. ISRM News Journal.

LOUREIRO, T. (2008). "Aspectos geotécnicos na construção de túneis em áreas urbanas. Aplicação a terrenos de baixa resistência do Miocénico de Lisboa". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia). Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

MANGOLIM FILHO, A. & OJIMA, L. (1995). "Planejamento de Investigações". *In*: TURB – Simpósio Sobre Túneis Urbanos, ABGE, pp 11-20.

MARINOS, V.; MARINOS, P. & HOEK, E. (2005). The Geological Strength index: applications and limitations. Bull. Eng. Geol. Environ., 64, pp. 55-65.

MARTINS, C.S. (1985). "Contribuição para o estudo de estruturas subterrâneas associadas a empreendimentos hidroeléctricos". Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.

MYRSET, O. (1982). Underground hydro-electric power stations in Norway. Norwegian Hard Rock Tunnelling, nº 1.

OLIVEIRA, C.S. (1977). "Sismologia, sismicidade e risco sísmico. Aplicação em Portugal". Relatório, Proc. 36/11/4394, LNEC, Lisboa.

OLIVEIRA, R. (1975). Túneis. Prospeccção geológica e geotécnica. Revista Geotecnia, Lisboa, 15, pp.137-151.

OLIVEIRA, R. (1994). "Caracterização geológica e geotécnica dos terrenos interessados por projectos de túneis rodoviários". *In*: Seminário sobre Túneis Rodoviários. Instituto Superior Técnico, Lisboa, pp.11-27.

OLIVEIRA, S. (2003). "Túneis Rodoviários em maciços rochosos". Estágio Curricular da licenciatura em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

PISTONE, R. S. (1989). "Estabilización integral de grandes excavaciones en roca". Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

- PLASENCIA, N. (2003). "Obras subterrâneas; Aspectos da contribuição da geologia de engenharia na concepção e anteprojecto detalhado". Dissertação para obtenção do grau de mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M.; FERREIRA, M.; ROCHA, R.; SOARES, A.; ZBYZEWSKI, G.; ALMEIDA, F.; CARVALHO, D. & MONTEIRO, J. (1979). "Introduction à la Géologie Générale du Portugal". Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 114 pp.
- RIBEIRO, M.A.; MARTINS, H.C.; ALMEIDA, A. & NORONHA, F. (2000). "Notícia Explicativa da Folha 6-C, Cabeceiras de Basto, na escala 1:50.000". Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- RODIO (2009). "Fotografias dos ensaios, Amostras e provetes – CEPASA". Documento não publicado, Abrunheira.
- RODRIGUES CARVALHO, J. (1981). "Site investigation; it's cost and benefits in Portugal". PhD Thesis, Universidade de Londres.
- ROXO, J. M. C. (1995). "Contribuição para o anteprojecto detalhado de túneis urbanos em solos rijos/rochas brandas". Dissertação apresentada na FCT-UNL para a obtenção do grau de Mestre em Geologia de Engenharia, Lisboa.
- RSAEEP (1983). "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes". Lisboa: Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E.P.
- SEG - Serviços de Engenharia e Geotecnia, S.A. (2009). "Reconhecimento Geológico-Geotécnico, Aproveitamento de Padroselos, Circuito hidráulico, Relatório preliminar". Relatório não publicado, Vila Nova de Gaia.
- SGP - Serviços Geológicos de Portugal (1992). "Carta Geológica de Portugal, escala 1:500.000". Lisboa.
- SILVA, A. P. F. da (2009a). "Caracterização e zonamento geotécnico de terrenos. Notas de aula". FCT/UNL, Campus de Caparica.
- SILVA, A. P. F. da (2009b). "Tuneladoras em escavações subterrâneas. Notas de aula". FCT/UNL, Campus de Caparica.
- SILVÉRIO, A. (1975). Ensaios in situ no domínio dos túneis em maciços rochosos. in Geotecnia. Revista Geotecnia, nº15, pp 43-76.
- SOUSA, L. R. (1983). "Concepção e cálculo de grandes estruturas subterrâneas". Programa de investigação submetido para obtenção da categoria de Investigador-Coordenador, LNEC, Lisboa.
- SOUSA, L. R. (2000). "Aspectos inovadores no anteprojecto detalhado e construção de estruturas subterrâneas". In: VII Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, FEUP.
- SOUSA, L. R.; LAMAS, L.N. & MARTINS, C.S. (1994). "Applications of computational mechanics to underground structures in hydraulic projects". In: E. Vargas, R. Azevedo, L.R. Sousa e M.M. Fernandes (eds.), "1st International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering", Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 15-88.
- SOUSA, L. R. & MENEZES, J.Q. (1993). "The use of underground storage of gases". In: L.R. Sousa (ed.), "Course on Underground Storage of Gases", LNEC, Lisboa.

UNE 22 950-3 (1990). "Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 3: Determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson". UNE, 24-Dec-1990, 10pp.

USACE – United States Army Corps of Engineer (1994). "Rock Foundations". Vicksburg: Engineer Manual 1110-1-2908, 30 Nov.

VALLEJO, L. I. González de (2002). "Ingeniería Geológica". Madrid: Prentice Hall, 744 pp.

WAHLSTROM, E. E. (1973). "Tunnelling in rock". Amsterdam: Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering, nº3.

WAHLSTROM, E. E. (1974). "Dams, dam foundations and reservoir sites". Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering, nº 6.

WALBO, S. (1982). "Air cushion surge chamber in Kvilldal power plant, The Ulla-Forre development". Norwegian Hard Rock Tunnelling, nº 1.

ZARUBA, Q. & MENCL, V. (1976). "Engineering geology". Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering, nº 10.

ANEXO – PEÇAS DESENHADAS